
BACHELORARBEIT

Herr Ing.
Hang Zhao

Aufbau eines Versuchs- standes zur Ermittlung der Thyristorparameter

Mittweida, 2013

BACHELORARBEIT

Aufbau eines Versuchstands zur Ermittlung der Thyristorparameter

Autor:

Herr Ing

Hang Zhao

Studiengang:

Mechatronik

Seminargruppe:

ME10W1-B

Erstprüfer:

Prof. Dr.-Ing. Lutz Rauchfuß

Zweitprüfer:

Dipl.-Ing. (FH) Jan Roloff

Einreichung:

Mittweida, 11.11.2013

Verteidigung/Bewertung:

Mittweida, 2013

Bibliografische Beschreibung:

Zhao, Hang:

Aufbau eines Versuchsstandes zur Ermittlung der Thyristorparameter. - 2013. -
<VII>, <54>, <0> S.

Mittweida, Hochschule Mittweida, Fakultät Maschinenbau, Bachelorarbeit, 2013

Referat:

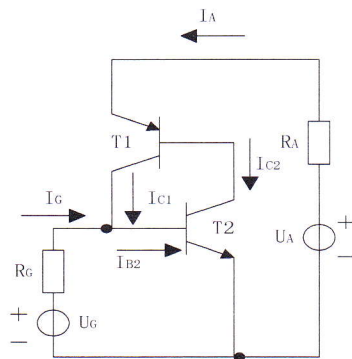
Die vorliegende Arbeit befasst sich mit der Vorstellung des Thyristors. Das Hauptziel ist aber, dass die statische Kennlinien und die Anwendung von dem Thyristor kennenlernen.

Aufgabenstellung Bachelorarbeit für Hang Zhao

Thema: Aufbau eines Versuchsstandes zur Ermittlung der Thyristorparameter

Mittweida, 01.08.2013

Im Rahmen der Bachelorarbeit soll ein Versuchsstand zur Ermittlung der Thyristorparameter erarbeitet werden. In diesem Zusammenhang wird eine Versuchsanleitung und Musterlösung zur Umsetzung der jeweiligen Schritte erstellt. Diese soll dann im Modul Leistungselektronik von den Studenten in der Bachelorausbildung durchgeführt werden.



Arbeitspakete:

1. Aufnahme der statischen Thyristorkennlinie
 - Ermittlung der statischen Kennlinie in Vorwärtssperr- und Durchlassrichtung
 - Quantitative grafische Darstellung der Ergebnisse
2. Messung der Gateimpulse
 - Grafische Auswertung mit Oszilloskop
3. Phasenanschnittsteuerung mit Thyristor
 - Einstellbaren Zündverzögerungswinkel α

Hochschulbetreuer:


Prof. Dr.-Ing Lutz Rauchfuß

Inhalt

Inhalt I

Abbildungsverzeichnis	III
Tabellenverzeichnis	V
Diagrammverzeichnis	VI
1 Übersicht	1
1.1 Motivation.....	1
1.2 Zielsetzung.....	1
1.3 Kapitelübersicht.....	1
2 Grundlagen	3
2.1 Entwicklung.....	3
2.2 Vorteile und Nachteile	3
2.3 Aufbau.....	3
2.4 Grundprinzip.....	5
2.5 Funktionsweise	6
2.6 Kenndaten des Thyristors.....	6
2.7 Versuch 1	7
2.7.1 Zielsetzung.....	7
2.7.2 Aufgabenstellungen.....	7
3 Statische Kennlinien aufnehmen	9
3.1 Versuch 2.....	10
3.1.1 Geräte	10
3.1.2 Zielsetzung.....	11
3.1.3 Aufgabenstellungen.....	11
3.1.3.1 Statische Thyristorkennlinien in Rückwärts- und Vorwärtssperrrichtung	11
3.1.3.2 Statische Thyristorkennlinien in Vorwärtsdurchlassrichtung	12
4 Messung des Gate-Impulses	14
4.1 Steuerschaltungen für Thyristor.....	14

II		Inhalt
4.2	Integrierte Schaltungen	14
4.3	Bauteile zur Impulsübertragung.....	19
4.3.1	Impulstransformator	19
4.3.2	Optoelektronische Koppelelemente	19
4.4	Gate-Impuls Messen	20
5	Phasenanschnittsteuerung	22
5.1	Funktion der Phasenanschnittsteuerung	22
5.1.1	Vertikalsteuerung	24
5.1.2	Horizontalsteuerung	25
5.2	Inbetriebnahmevorschriften	27
5.2.1	Funktion und Inbetriebnahme des Übungsmodells	27
5.3	Phasenanschnittsteuerung mit Thyristor.....	29
5.3.1	Digitale Simulation.....	29
5.3.1.1	Portunus.....	29
5.3.2	Versuch 3.....	32
5.3.2.1	Zielsetzung.....	33
5.3.2.2	Arbeitsplan	33
5.3.2.3	Aufgabenstellungen.....	34
5.4	Phasenanschnittsteuerung mit Antiparallelschaltung zweier Thyristoren	40
5.4.1	Versuch 3 (weitermachen).....	41
5.4.1.1	Arbeitsplan	41
5.4.1.2	Aufgabenstellungen.....	42
6	Schutz und Beschaltung.....	49
6.1	Schutz vor Überspannung	49
6.2	Schutz vor Überstrom.....	51
	Literatur	53
	Selbstständigkeitserklärung	55

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 2- 1: Aufbau des Thyristors.....	4
Abbildung 2- 2: Bauform des Thyristors.....	4
Abbildung 2- 3: Schaltzeichen des Thyristors.....	4
Abbildung 2- 4: Thyristor-Ersatzschaltung.....	5
Abbildung 2- 5: Schaltplan des Grundprinzips.....	5
Abbildung 2- 6: Schaltplan von Versuch 1.....	7
Abbildung 3- 1: Statische Kennlinien des Thyristors.....	9
Abbildung 3- 2: Schaltplan von Vorwärtssperrrichtung.....	11
Abbildung 3- 3: Schaltplan von Rückwärtssperrrichtung.....	11
Abbildung 3- 4: Kennlinien von Vorwärts- und Rückwärtssperrrichtung.....	12
Abbildung 3- 5: Schaltplan von Vorwärtsdurchlassrichtung.....	12
Abbildung 3- 6: Durchlasskennlinien.....	13
Abbildung 4- 1: Blockschaltbild.....	15
Abbildung 4- 2: Impulsdiagramm.....	16
Abbildung 4- 3: PIN-Belegung TCA 785.....	16
Abbildung 4- 4: Beispiel.....	18
Abbildung 4- 5: Symbol von Optokoppler, mit Fototransistor als Ausgang.....	19

Abbildung 5- 1: Prinzip der Anschnittsteuerung	23
Abbildung 5- 2: Vertikalsteuerung.....	24
Abbildung 5- 3: Horizontalsteuerung	25
Abbildung 5- 4: Zeitlicher Verlauf der Systemgrößen von Horizontalsteuerung	26
Abbildung 5- 5: Übungsmodell	27
Abbildung 5- 6: Einstellungen digitaler Simulation	30
Abbildung 5- 7: Phasenanschnittsteuerung mit ohmscher Last	31
Abbildung 5- 8: Phasenanschnittsteuerung mit induktiver Last.....	32
Abbildung 5- 9: Versuchsaufbau.....	34
Abbildung 5- 10: Antiparallelschaltung von zwei Thyristoren	41
Abbildung 5- 11: Versuchsaufbau.....	42
Abbildung 6- 1: Freiwerdezeit am Thyristor	49
Abbildung 6- 2: TSE-Schutzbeschaltung	50
Abbildung 6- 3: Brückenbeschaltung	51
Abbildung 6- 4: Schmelzsicherung	52

Tabellenverzeichnis

Tabelle 2- 1: Resultate von Versuch 1..... 7

Tabelle 4- 1: Definition und Funktion von Pin 16

Diagrammverzeichnis

Diagramm 1: Gate-Impuls bei Steuerwinkel = 0°	20
Diagramm 2: Gate-Impuls bei Steuerwinkel = 180°	21
Diagramm 3: Gate-Impuls	21
Diagramm 4: Thyristorspannung U_{V1} und Zündspannung U_Z bei $\varphi_Z=60^\circ$	35
Diagramm 5: Lastspannung U_{L1} bei $\varphi_Z=60^\circ$	35
Diagramm 6: Netzspannung und Laststrom I_{L1} bei $\varphi_Z=60^\circ$	36
Diagramm 7: Thyristorspannung U_{V1} und Zündspannung U_Z bei $\varphi_Z=60^\circ$	37
Diagramm 8: Lastspannung U_{L1} bei $\varphi_Z=60^\circ$	37
Diagramm 9: Netzspannung und Laststrom I_{L1} bei $\varphi_Z=60^\circ$	38
Diagramm 10: Thyristorspannung U_{V1} und Zündspannung U_Z bei $\varphi_Z=60^\circ$	39
Diagramm 11: Lastspannung U_{L1} bei $\varphi_Z=60^\circ$	39
Diagramm 12: Lastspannung U_{L1} bei $\varphi_Z=60^\circ$	40
Diagramm 13: Thyristorspannung U_{V1} und Zündspannung U_Z bei $\varphi_Z=60^\circ$	43
Diagramm 14: Lastspannung U_{L1} bei $\varphi_Z=60^\circ$	43
Diagramm 15: Netzspannung und Laststrom I_{L1} von positiver Halbwelle bei $\varphi_Z=60^\circ$	44
Diagramm 16: Netzspannung und Laststrom I_{L1} von negativer Halbwelle bei $\varphi_Z=60^\circ$	44
Diagramm 17: Thyristorspannung U_{V1} und Zündspannung U_Z bei $\varphi_Z=60^\circ$	45
Diagramm 18: Lastspannung U_{L1} bei $\varphi_Z=60^\circ$	45
Diagramm 19: Netzspannung und Laststrom I_{L1} von positiver Halbwelle bei $\varphi_Z=60^\circ$	46

Diagramm 20: Netzspannung und Laststrom I_{L1} von negativer Halbwelle bei $\varphi_Z=60^\circ$	46
Diagramm 21: Thyristorspannung U_{V1} und Zündspannung U_Z bei $\varphi_Z=120^\circ$	47
Diagramm 22: Lastspannung U_{L1} bei $\varphi_Z=120^\circ$	47
Diagramm 23: Netzspannung und Laststrom I_{L1} von positiver Halbwelle bei $\varphi_Z=120^\circ$	48
Diagramm 24: Netzspannung und Laststrom I_{L1} von negativer Halbwelle bei $\varphi_Z=120^\circ$	48

1 Übersicht

Im einleitenden Kapitel werden die Motivation und die Aufgabenstellung dieser Bachelorarbeit besprochen. Gleichzeitig erfolgt ein kurzer Überblick zu den einzelnen Kapiteln dieser Arbeit.

1.1 Motivation

Thyristoren sind die wichtigsten Bauelemente der Leistungselektronik im Bereich großer Leistungen.

Der Thyristor ist das erste steuerbare Halbleiterbauelement für große elektrische Leistungen. Es erschließen sich schnell vielfältige Anwendungsgebiete. Mit der Expansion von den Anwendungsgebieten entwickelt sich der Thyristor in der Richtung von Hochspannung, großem Strom, Schnelligkeit, Integration und günstigem Preis.

Heute werden Schaltungen der Leistungselektronik mit Siliziumdioden und Siliziumthyristoren aufgebaut, die mit Sperrfähigkeiten bis ca. 4 500 V und Strombelastbarkeiten bis ca. 3 000 A zur Verfügung stehen. Deren unübertroffene Schaltleistung sowie die Verbesserung der Parameter fördern die Entwicklung der neuen Thyristortypen und Wachstum der Marktvolumen. Thyristor spielt eine wichtige Rolle in der Leistungselektronik.

1.2 Zielsetzung

- Kennenlernen des Aufbaus und Grundprinzips des Thyristors
- Aufnahme der statischen Thyristorkennlinien
- Kennenlernen des Zündverhaltens von Thyristoren
- Messung des Gate-Impulses
- Phasenanschnittsteuerung
- Schutz der Schaltung und Beschaltung

1.3 Kapitelübersicht

Die Bachelorarbeit besteht aus sechs Kapiteln.

Nach der allgemeinen Einleitung des ersten Kapitels werden im **Kapitel 2** die Grundlagen des Thyristors erläutert. Es beschreibt die Entwicklung, die Vor- und Nachteile, den Aufbau des Thyristors, sowie das Grundprinzip und die Funktionsweise.

Anschließend wird im **Kapitel 3** die statische Kennlinie von Thyristoren gezeichnet und anhand der Verläufe das Schaltverhalten erläutert. Durch einen Versuch wird die praktische, statische Kennlinie aufgenommen.

Folgend wird im **Kapitel 4** die Messung des Impulsstroms vorgestellt und die Bedingungen der Zündung von dem Thyristor beschrieben. Zusätzlich wird der Steuerbaustein TCA 785 vorgestellt.

Im **Kapitel 5** werden die Funktion der Phasenanschnittsteuerung und das Übungsmodell vorgestellt. Dazu werden die Versuchsdaten gezeigt. Die Versuchsdaten beinhalten in unterschiedlichem Fall die Verläufe der Thyristor- und Zündspannung bzw. die Verläufe der Lastspannung und Laststrom.

Schließlich wird im **Kapitel 6** die Aufgaben verschiedener Überstromschutzorgane wie Sicherung, Schalter erklärt.

2 Grundlagen

In diesem Kapitel wird den Aufbau, Grundprinzip und Kenndaten des Thyristors vorgestellt. An dieser Basis wird der Versuch durchgeführt, um die Ein- und Ausschaltensvoraussetzung zu prüfen.

2.1 Entwicklung

Der Thyristor wurde 1956 an den Bell Laboratories erfunden. Die ersten Thyristoren wurden 1957 bei General Electric (GE) entwickelt. Zunächst wurde das Bauteil als SCR gezeichnet (von englisch silicon controlled rectifier). Der Thyristor beginnt ab 1958 kommerziell. Danach erschließen es sich schnell vielfältige Anwendungsgebiete.

2.2 Vorteile und Nachteile

Vorteile des Thyristors:

- hohe Schaltgeschwindigkeit
- geringe Steuerleistung
- optische Ansteuerung
- kleine Größe und geringes Gewicht

Nachteile des Thyristors:

- nur Ansteuerung von Einschalten, keine Ansteuerung von Ausschaltung
- für Wechselstrom ist Triac oder zwei Thyristoren nötig
- nur ein Stromkreis
- Leckstrom
- Überlastbarkeit begrenzt
- Temperaturbereich

2.3 Aufbau

Ein Thyristor besteht aus vier Halbleiterschichten. Der Thyristor hat drei pn-Übergänge in der Folge pnpn. Und er hat 3 Anschlüsse: Anode, Kathode und einen Gate-Anschluss.

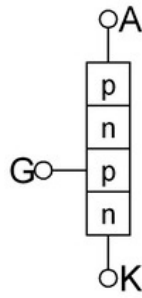


Abbildung 2- 1: Aufbau des Thyristors



Abbildung 2- 2: Bauform des Thyristors

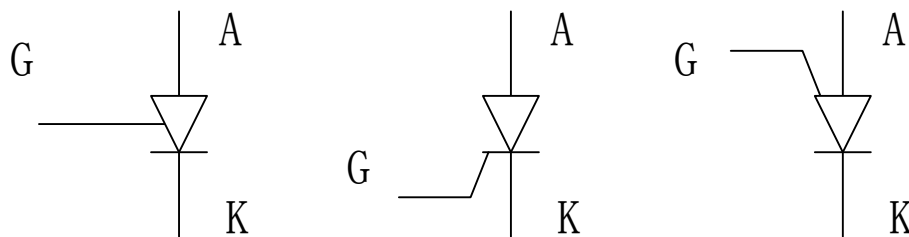


Abbildung 2- 3: Schaltzeichen des Thyristors

Links: Allgemeines Schaltzeichen des Thyristors Mitte: P-gesteuerter Thyristor

Rechts: N-gesteuerter Thyristor

Die außen liegende P-Schicht bildet die Anode und die außen liegende N-Schicht bildet die Kathode. Der dritte Anschluss, das Gate, ist ein Steueranschluss und kann mit einer der beiden innen liegenden Halbleiterschichten verbunden werden.

Es können 2 Typen von Thyristoren unterschieden werden:

An der P – leitenden Zone vor der Kathode ist üblicherweise das Gate angebracht. Solche Thyristoren heißen P – Gate – oder auch kathodenseitig steuerbare Thyristoren.

Seltener werden Thyristoren mit N – Gate – Anschluss eingesetzt. Solche Thyristoren heißen N – Gate – oder auch anodenseitig steuerbare Thyristoren.

2.4 Grundprinzip

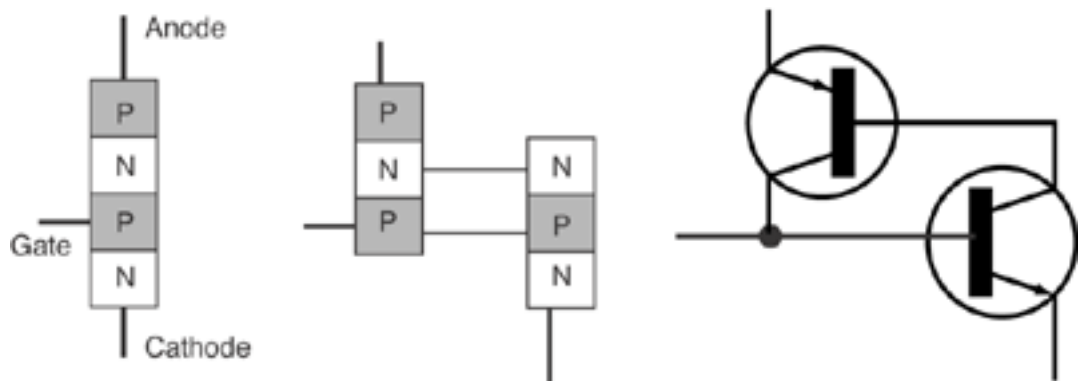


Abbildung 2- 4: Thyristor-Ersatzschaltung

Thyristoren können als zwei verbundene Transistoren (PNP und NPN) angesehen werden. Dabei wird die Basis des PNP-Transistors mit dem Kollektor des NPN-Transistors verbunden. Demnach besteht eine Verbindung zwischen dem Kollektor des PNP-Transistors und der Basis des NPN-Transistors.

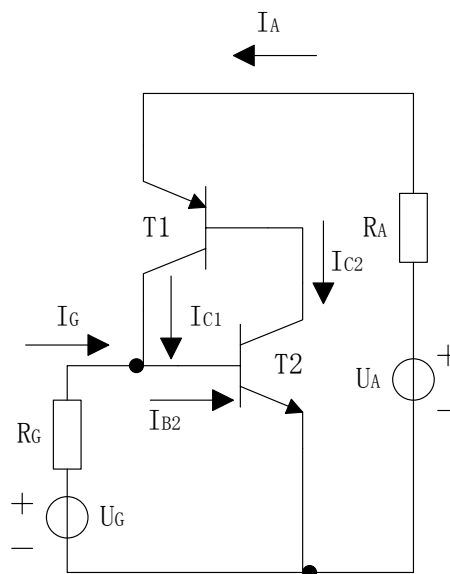


Abbildung 2- 5: Schaltplan des Grundprinzips

- a) Wenn der Thyristor eine positive Anodenspannung und ein Gate-Strom hat, entsteht eine starke positive Rückkopplung.

$$I_G = I_{B2} \rightarrow I_{C2} = \beta_2 I_{B2} = I_{B1} \rightarrow I_{C1} = \beta_1 I_{B1} = \beta_1 \beta_2 I_G = I_{B2}$$

Dabei sind die beiden Transistoren in einem sehr kurzen Zeitraum gesättigt und leitend.

Der Thyristor bleibt elektrisch leitend, selbst wenn die Steuerschaltung abschaltet, da der Basis-Strom I_{B2} von dem Transistor T2 folgende Beziehung hat: $I_{B2} = I_{C1} \approx I_A > I_G$.

- b) Wenn der Thyristor nur eine positive Anodenspannung (und keinen Gate- Strom) hat,

gibt es kein Eingangssignal. Deshalb ist der Thyristor nicht leitend.

- c) Wenn der Thyristor keine positive Anodenspannung besitzt, arbeitet der Transistor nicht. Die Signale werden nicht verstärkt.

2.5 Funktionsweise

Einschalten

Über das Gate kann der Thyristor gezündet werden. Voraussetzung dafür ist eine positive Spannung zwischen Anode und Kathode, sowie ein Mindeststrom durch die mittlere Sperrschicht. Der Thyristor kann durch einen kleinen Gatestrom eingeschaltet werden. Nach dem Einschalten bleibt der Thyristor auch ohne Gatestrom elektrisch leitend.

Ausschalten

Unter dem Haltestrom I_H sperrt der Thyristor wieder. Durch Abschalten oder Umpolen der Spannung im Laststromkreis oder im Stromnulldurchgang des Lastkreises wird der Thyristor in den Sperrzustand versetzt.

2.6 Kenndaten des Thyristors

U_N	Nennspannung
U_{RRM}	Zulässige periodische Spitzensperrspannung in Rückwärtsrichtung
U_{DRM}	Zulässige periodische Vorwärtssperrspannung
U_{B0}	Kippspannung
$U_{(B0)0}$	Nullkippspannung
$U_{(BR)}$	Durchbruchspannung
U_G	Gatespannung
U_{GT}	Zündspannung
I_N	Nennstrom
I_H	Haltstrom
I_L	Einraststrom muss mindestens fließen, damit nach Wegfall des Steuerimpulses der Thyristor leitend bleibt.
I_{TAVM}	Zulässiger Dauer-Durchlassstrom des Thyristors (arithmetischer Mittelwert)
I_G	Gatestrom
I_{GT}	Zündstrom
t_{qd}	Zündverzugszeit
t_q	Freiwerdezeit

2.7 Versuch 1

2.7.1 Zielsetzung

Durch den Versuch werden die Voraussetzungen des Einschaltens und Ausschaltens aufgezeigt.

2.7.2 Aufgabenstellungen

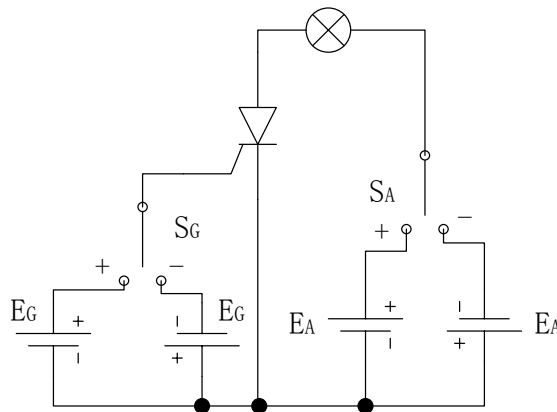


Abbildung 2- 6: Schaltplan von Versuch 1

Nr.	Vor dem Experiment			Nach dem Experiment				
	Schalter		Lampe	Schalter		Spannungsrichtung		Lampe
	SA	SG		SA	SG	Anode	Gate	
1	Aus	Aus	aus	-	Aus	negativ	Aus	aus
2	Aus	Aus	aus	-	-	negativ	negativ	aus
3	Aus	Aus	aus	-	+	negativ	positive	aus
4	Aus	Aus	aus	+	Aus	positiv	Aus	aus
5	Aus	Aus	aus	+	-	positiv	negativ	aus
6	Aus	Aus	aus	+	+	positiv	positiv	ein

Tabelle 2- 1: Resultate von Versuch 1

Zuerst werden die zwei Schalter ausgeschaltet. Nach **Tabelle 2- 1** befinden sich beide Schalter im eingeschalteten Zustand. Das Resultat ist protokolliert. Wenn der Thyristor leitend ist, leuchtet die Lampe.

Fazit: Aus 1, 2 und 3 bekommt man folgende Schlussfolgerung: Wenn der Thyristor eine negative Anodenspannung hat, bleibt er auf jeden Fall nicht leitend.

Aus 4, 5 und 6 erhält man wiederum den Entschluss: Nur wenn der Thyristor eine positive Anodenspannung und eine positive Zündspannung hat, kann er leiten.

3 Statische Kennlinien aufnehmen

Im Grundzustand ist der Thyristor in beiden Richtungen sperrend.

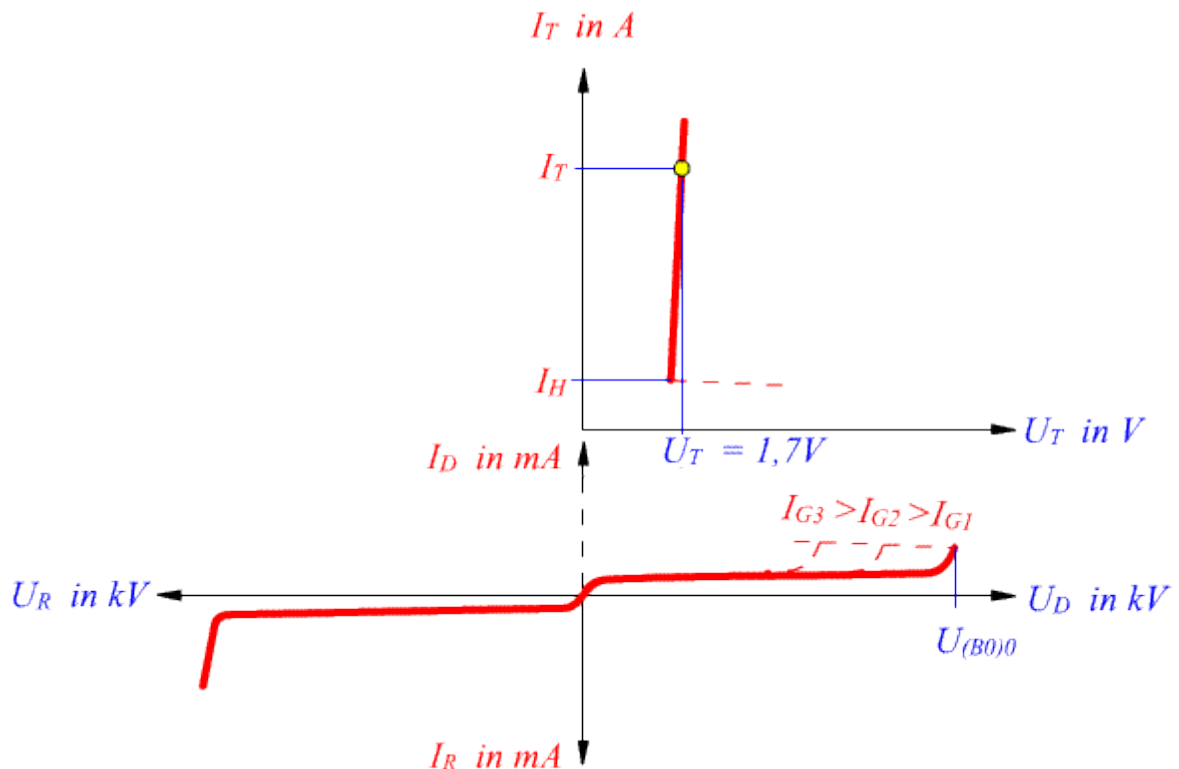


Abbildung 3- 1: Statische Kennlinien des Thyristors

Rückwärtssperrozustand:

Bei Beanspruchung in Rückwärtsrichtung verhält sich der Thyristor wie eine Diode. Bis zur Durchbruchspannung $U_{(BR)}$ fließt nur ein sehr kleiner negativer Sperrstrom I_R . Ein Überschreiten der Durchbruchspannung führt zur Zerstörung.

Blockierzustand:

Bei Beanspruchung in Vorwärtsrichtung sperrt das Bauelement mit $I_G = 0$ bis zur Nullkippspannung $U_{(BO)0}$. Und es kann ein sehr geringer Blockierstrom I_D fließen. Index D steht für den Vorwärts-Sperrbereich (Blockierbereich).

Nullkippspannung mit Überkopfzündung:

Wenn die Anodenspannung ohne Gate-Ansteuerung größer als die Nullkippspannung ist, geriet der mittlere, gesperrte np-Übergang in den Durchbruch. Der Blockierstrom steigt plötzlich an und der Thyristor zündet. Diese Betriebsart ist für Thyristoren verboten.

Gatesteuerung:

Über das Gate kann der Thyristor gezündet werden, jedoch nicht mehr ausgeschaltet. Die Ansteuerung sollte mit geeigneten Zündimpulsen und nicht mit konstanter Gleichspannung erfolgen. Je größer der Zündstrom I_G , desto früher beginnt der Thyristor zu leiten.

3.1 Versuch 2

3.1.1 Geräte

- Experimentierplatte mit Thyristor:

Der Thyristor hat eine periodische Spitzensperrspannung von 400 V, einen Dauergrenzstrom von 1 A und einen maximalen Gatestrom von 20 mA. Die Sperrströme liegen im Bereich von maximal einigen μA .

- 2 Gleichspannungsversorgungsmodule 0 ... 30 V, 0 ... 1 A
- 1 Stromversorgungsmodul 3 x 0 ... 230 / 400 V (AC), $I_{\max} = 5 \text{ A (eff.)}$, $f = 50 \text{ Hz}$

1 x 0 ... 250 V (DC), $I_{\max} = 6 \text{ A}$

- 3 Digitalmultimeter:

Diese Digitalmultimeter haben Gleich- und Wechselspannungsmessbereiche, sowie Gleich- und Wechselstrommessbereiche mit teilweise automatischer Messbereichsabpassung

Die Spannungsmessbereiche erstrecken sich von 0,1 V bis zu 1000 V.

Die Strommessbereiche liegen zwischen einigen μA und 10 A.

Bei Wechselstrom- und Wechselspannungsmessungen werden die echten Effektivwerte angezeigt.

Die Innenwiderstände der Messgeräte betragen in den Spannungsmessbereichen etwa $10\text{M}\Omega$.

In den Strommessbereichen tritt infolge des Innenwiderstandes ein Spannungsabfall über dem Amperemeter von bis zu etwa 0,2 V auf.

- Festwiderstand
- Schiebewiderstand

3.1.2 Zielsetzung

Der Versuch soll zum Erwerb von Kenntnissen, Fähigkeiten und Fertigkeiten zu folgenden Schwerpunkten beitragen:

- Aufnahme der statischen Thyristorkennlinien in Rückwärtssperrrichtung, Vorwärtssperrrichtung und Vorwärtsdurchlassrichtung
- Messtechnische Bestimmung statischer Thyristorparameter
- Zündverhalten von Thyristor

3.1.3 Aufgabenstellungen

3.1.3.1 Statische Thyristorkennlinien in Rückwärts- und Vorwärtssperrrichtung

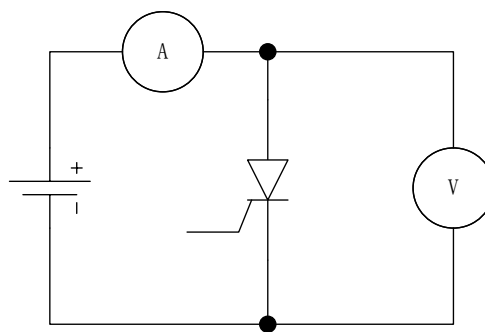


Abbildung 3- 2: Schaltplan von Vorwärtssperrrichtung

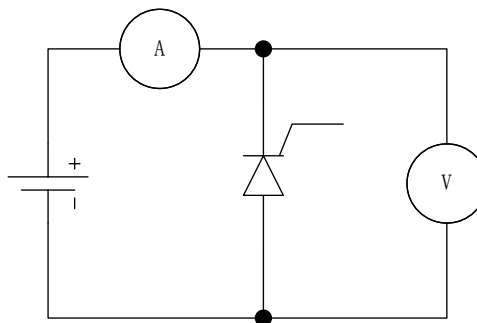


Abbildung 3- 3: Schaltplan von Rückwärtssperrrichtung

Zunächst wird die Schaltung nach **Abbildung 3- 2** aufgebaut. Die Anodenspannung erhöht sich allmählich. Mit steigender Spannung erhöht sich der Sperrstrom langsam. Der Thyristor ist blockiert, deshalb fließt nur ein sehr kleiner, positiver Sperrstrom. Der Wachstumstrend ist in der blauen Linie dargestellt.

Der Aufbau nach Abbildung 3-3 ändert die Richtung des Thyristors. Bei Beanspruchung in Rückwärtsrichtung sperrt der Thyristor. Die Anodenspannung erhöht sich allmählich. Dabei ist der Strom sehr klein. Mit steigender Spannung erhöht der Sperrstrom langsam. Der Wachstumstrend ist in der roten Linie dargestellt.

Wenn die Spannung die Durchbruchspannung U_{BR} oder die Nullkippspannung $U_{(BO)0}$ überschreitet, wird der Thyristor zerstört. Deshalb wird nur die Spannung von -250 V bis 250 V gemessen.

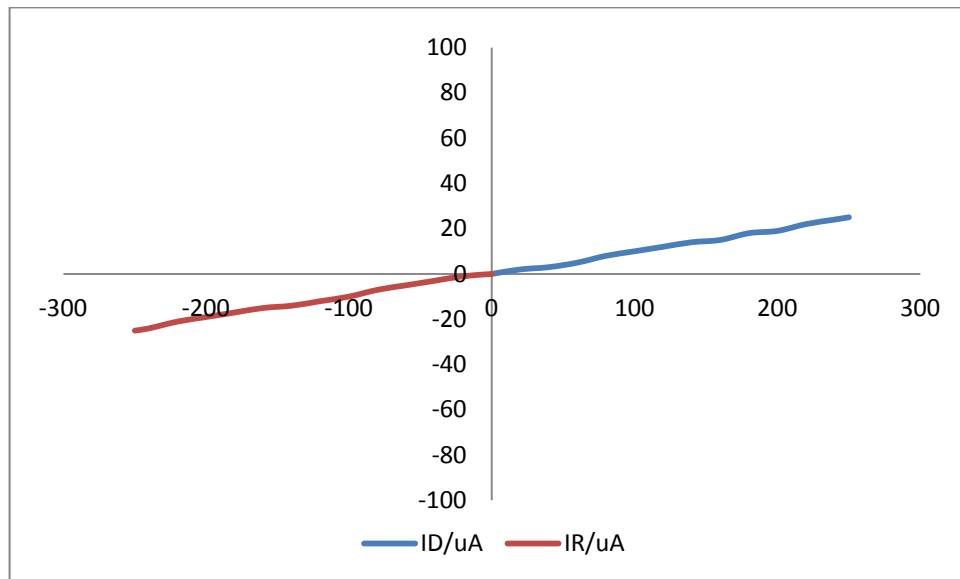


Abbildung 3- 4: Kennlinien von Vorwärts- und Rückwärtssperrrichtung

3.1.3.2 Statische Thyristorkennlinien in Vorwärtsdurchlassrichtung

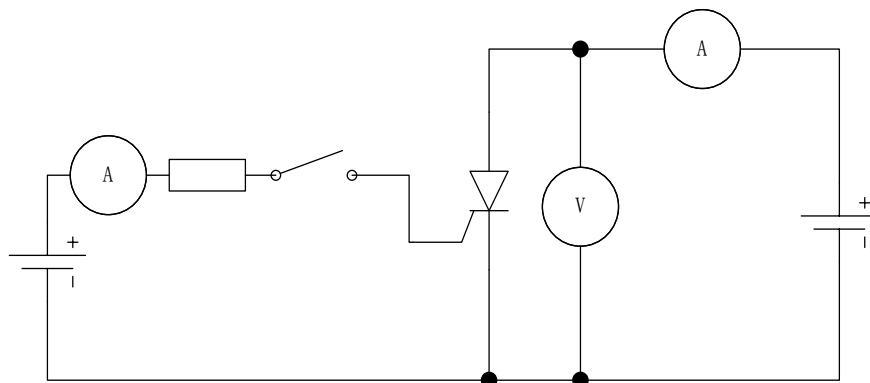
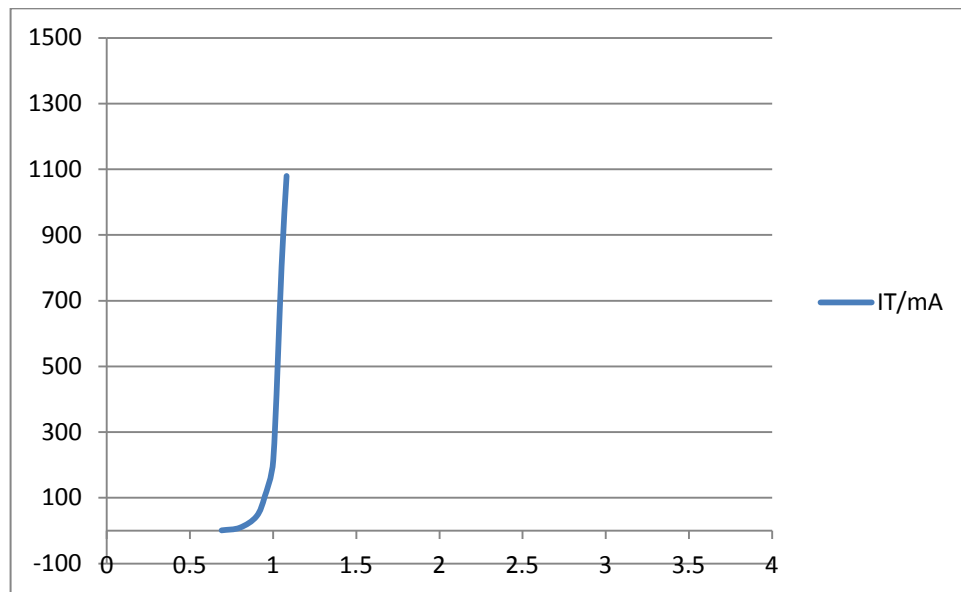


Abbildung 3- 5: Schaltplan von Vorwärtsdurchlassrichtung

Es wird eine Schaltung laut Abbildung 3-5 aufgebaut. Das Gleichspannungsversorgungsmodul wird eingestellt, sodass der Strom I_G 20 mA beträgt. Die positive Anodenspannung erhöht sich langsam. Mit der zunehmenden Spannung erhöht der Strom I_T rasant. Die **Abbildung 3- 6** zeigt die Beziehung zwischen Strom I_T und Spannung U_T .

**Abbildung 3- 6: Durchlasskennlinien**

Nach Ausschalten der Steuerschaltung bleibt der Thyristor noch leitend. Das heißt, der Thyristor ist ein einschaltbares Bauelement. Er ist im Ausgangszustand nichtleitend und kann durch einen kleinen Gatestrom eingeschaltet werden. Nach dem Einschalten bleibt der Thyristor auch ohne Gatestrom leitend.

Nach dem Ausschalten der Gateschaltung wird der Strom I_T langsam reduziert. Wenn er ein Mindeststrom unterschreitet, wird der Thyristor ausgeschaltet. Der Mindeststrom wird als Haltestrom I_H bezeichnet. Hier beträgt $I_H = 0,032 \text{ A}$.

4 Messung des Gate-Impulses

Der als Zündung bezeichnete Vorgang wird durch impulsförmige Ladungsträgerzufuhr über die Steuerelektrode G eingeleitet.

4.1 Steuerschaltungen für Thyristor

Soll ein Thyristor gezündet werden, so müssen folgende Bedingungen erfüllt sein:

- Der Thyristor muss sich im Blockierbereich befinden (Anode +, Kathode -).
- Es muss eine bestimmte Mindestspannung (U_{AK}) vorhanden sein.
- Zwischen Gate (+) und Kathode (-) muss ein hinreichend großes Potenzial anstehen, so dass ein entsprechender Gatestrom fließen kann.
- Möglichst steile Impulsflanken für den Zündstrom.
- Die Zündimpulse müssen verschiebbar sein, um die Ausgangsspannung eines Stromrichters zu steuern.
- Die Zündimpulse müssen mit der Netzspannung synchronisiert werden. ([FEBU06])

Zur Zündung von Thyristoren verwendet man Halbleiter, die bei niedriger Spannung hochohmig sind und ab einer Durchbruchspannung plötzlich niederohmig werden. Die diskreten Bauelemente sind hauptsächlich Diacs, Vierschichtdioden und Steuerschaltungen mit Unijunktion-Transistor (Doppelbasisdiode bzw. UJT).

Dabei haben die Ansteuerung von Thyristoren durch Diacs oder Vierschichtdioden den Nachteil, dass der Steuerbereich der Netzhalbwellen eingeschränkt ist. Und der Nachteil von diskreten Triggerbauelementen ist insbesondere im Drehstromnetz die schlechte Synchronisierbarkeit der gesteuerten Phasen zueinander. Deshalb werden heute Zündgeräte hauptsächlich in integrierter Form aufgebaut. Aufgebaute Steuergeräte mit integrierten Schaltungen können hohe Anforderungen für industrielle Anwendungen entsprechen.

4.2 Integrierte Schaltungen

Für Steuergeräte der Stromrichtertechnik wurden spezielle monolithisch integrierte Schaltungen entwickelt, die sich für eine Fülle verschiedener Ansteuerungen verwenden lassen.

Typische Anwendungen sind Stromrichterschaltungen, Wechselstromsteller und Drehstromsteller.

Im Übungsmodell findet der Phasenanschnittbaustein TCA 785 Verwendung.

Anwendungsfeld:

- Versorgungsspannungsbereich von +8 bis 18 V
- Temperaturbereich von -25 bis +85°C
- Maximale Betriebsfrequenz von 10 bis 500Hz
- Maximale Breite des Ausgangsimpulses 180°
- Stromaufnahme nur 4,5 bis 10 mA
- Zwei Ausgänge für je 250 mA Zündstrom, zwei Zusatzausgänge mit Inversfunktion
- Inhibit-Funktion: Zündimpulssperre, Gittersperre
- Zündimpulsverlängerung durch externen Kondensator
- Sicheres Erkennen des Nulldurchgangs
- Schutzschaltung gegen Fehlzündung

Die Signalerzeugung im Steuerbaustein TCA 785 entsteht folgendermaßen:

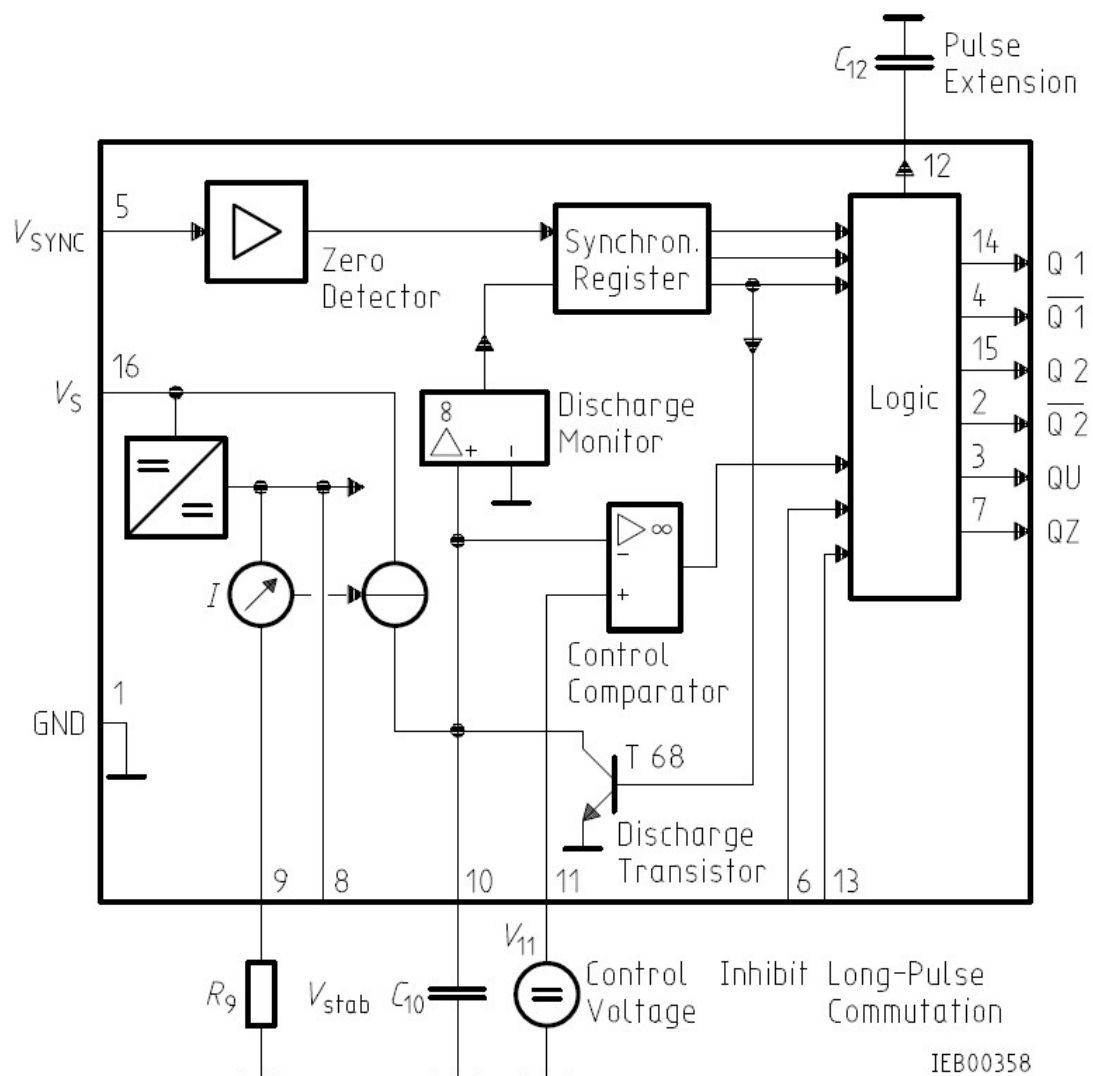


Abbildung 4- 1: Blockschaltbild

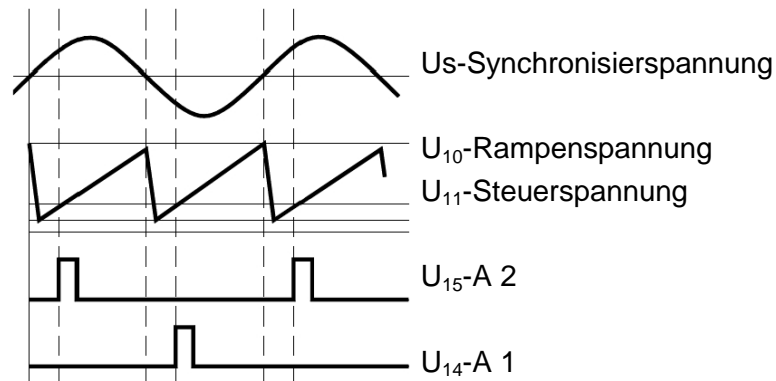


Abbildung 4- 2: Impulsdiagramm

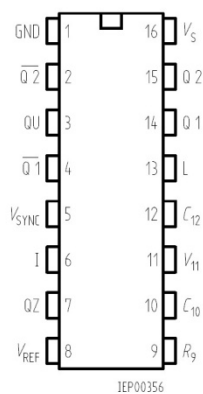


Abbildung 4- 3: PIN-Belegung TCA 785

Pin	Symbol	Funktion
1	GND	Masse
2	$\overline{Q2}$	Ausgang 2 inv.
3	QU	Ausgang U
4	$\overline{Q1}$	Ausgang 1 inv.
5	U_{Syn}	Synchronspannung
6	I	Inhibi
7	QZ	Ausgang Z
8	U_{REF}	Stab. Spannung
9	R_9	Rampenwiderstand
10	C_{10}	Rampenkapazität
11	U_{11}	Steuerspannung
12	C_{12}	Impulsverlängerung
13	L	Langimpuls
14	Q1	Ausgang 1
15	Q2	Ausgang 2
16	U_S	Speisespannung

Tabelle 4- 1: Definition und Funktion von Pin

Funktionsbeschreibung:

Über einen hochohmigen Widerstand wird die Netzspannung als Synchronisiersignal für den TCA 785 an PIN 5 abgeleitet (U_{syn}). Ein sogenannter Nulldetektor (Nullpunkterkennung des Netzsignals) wertet die Nulldurchgänge der Netzspannung aus und führt sie dem Synchronisierspeicher zu. Dieser steuert einen Rampengenerator, dessen Kondensator C_{10} (PIN10) durch einen Konstantstrom über R_9 aufgeladen wird und somit ein lineares Sägezahnsignal erzeugt.

Ein Komparator vergleicht die Sägezahnspannung mit der Steuerspannung (intern oder extern) und steuert damit den TCA 785.

Überschreitet das Sägezahnsignal des Rampengenerators die eingestellte Steuerspannung (PIN 11), so wird ein Signal an die Logik weitergeleitet. Diese bewirkt die entsprechenden Zündimpulse an den Ausgängen PIN 14 und 15.

Die Entladeüberwachung sorgt über den Entladetransistor dafür, dass zu Beginn jeder Halbwelle der Kondensator C_{10} auch wirklich entladen ist. Dadurch ist eine hohe Wiederholgenauigkeit des eingestellten Steuerwinkels gewährleistet.

In der Betriebsart Vollwellensteuerung wird durch einen Teiler die gleichgerichtete Sekundärspannung des Netztrafos (100Hz) auf 2Hz geteilt, was einer Torzeit von 500ms entspricht.

Am Eingang PIN 6 können die Zündimpulse für die Vollwellensteuerung gesperrt werden. Dadurch wird der Phasenwinkel zwangsweise immer auf 0° gesetzt, was einer Schwingungspaketsteuerung gleichkommt (Funkstörfreies Schalten der Leistungshalbleiter im Spannungsnulldurchgang der Netzspannung). Diese Torzeit synchronisiert einen Sägezahngenerator mit einem Spannungshub von 10V.

Die übrigen PIN's ermöglichen eine Veränderung der Impulsform und -dauer der Zündimpulse oder eine logische Verknüpfung mit weiteren TCA 785. Auf Sie wird hier nicht näher eingegangen.

Beispiel:

4.3 Bauteile zur Impulsübertragung

Bauteile zur Impulsübertragung dienen in der Leistungselektronik in erster Linie zur galvanischen Trennung von Steuer- und Laststromkreis. Diese Koppellemente ermöglichen Spannungspotentialunterschiede bis zu einigen KV und problemlose Pegelanpassung von Steuer- und Leistungselektronik. Das Übertragungsmedium kann sowohl elektromagnetisch als auch optoelektronisch sein.

4.3.1 Impulstransformator

Der Impulstransformator dient zur Informationsübertragung von Analog- oder Digitalsignalen. Induktive Impulsübertrager sind von Aufbau her kleine Transformatoren mit getrennter Primär- und Sekundärwicklung im Windungsverhältnis 1:1. Die Informationsübermittlung erfolgt auf der Basis der elektromagnetischen Signalübertragung.

Impulstransformatoren können als Zündübertrager zur Übertragung des Zündimpulses für Thyristoren vom Ansteuerkreis auf den Lastkreis angewandt werden.

4.3.2 Optoelektronische Koppellemente

Ein Optokoppler ist ein Bauelement der Optoelektronik. Er besteht aus einem optischen Sender, typischerweise ist dies eine Leuchtdiode (LED), und einem optischen Empfänger wie einem Fototransistor, welche beide in einem lichtundurchlässigen Gehäuse untergebracht sind.

Beim Optokoppler erfolgt die Signalübertragung auf der Eingangsseite über einen Sender, in der Regel eine Infrarot-Luminiszenzdiode, während als Empfänger auf der Ausgangsseite ein Fototransistor geschaltet ist. Ihr weiter Frequenzbereich und die geringe Baugröße machen sie Impulstransformatoren weit überlegen.

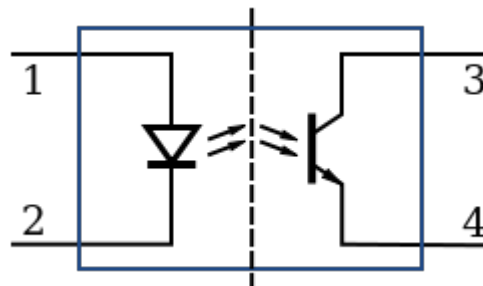


Abbildung 4- 5: Symbol von Optokoppler, mit Fototransistor als Ausgang

Vorteile von Optokopplern:

- Kleine Abmessungen
- Digitale und analoge Signalübertragung möglich
- Geringe Koppelkapazitäten zwischen Ein- und Ausgang
- Keine Induktivitäten
- Keine Störung durch Magnetfelder

- Galvanische Trennung der Eingangs- und Ausgangsstromkreise

Nachteile von Optokopplern:

- Höhere Spannungsabfälle im Ausgangskreis als bei Relais
- nur eine Stromrichtung im Ausgangskreis möglich
- Sendediode erfordert externen Vorwiderstand (Ausnahme: Solid-State-Relais)
- Ein- und Ausgangskreis sind im Vergleich zu Relais empfindlicher gegenüber Überlast und Störimpulsen

4.4 Gate-Impuls Messen

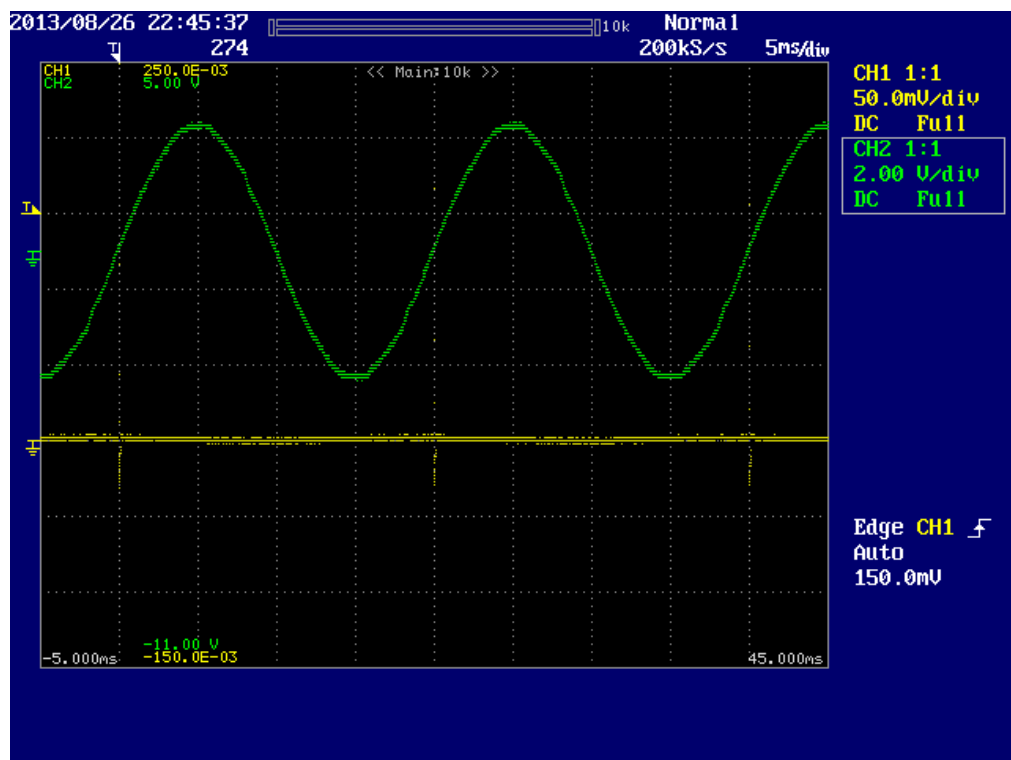


Diagramm 1: Gate-Impuls bei Steuerwinkel = 0°

Die Zündspannung wird direkt an den Anschlüssen G und K (siehe Abb. 2-3) ermittelt.

Die grüne Linie zeigt die Netzspannung. Die gelbe Linie zeigt die Zündspannung. Aus den Diagrammen eins und zwei weiß man, dass der Steuerwinkel (auch Zündwinkel) zwischen 0° und 180° verschoben werden kann. Ab diesem Zeitpunkt ist der Thyristor elektrisch leitend. Im Diagramm 1 ist der Steuerwinkel 0°. Im Gegensatz dazu ist der Steuerwinkel im Diagramm 2 180°.

Während des Versuchs beträgt die Impulsdauer $t = 30\mu\text{s}$.

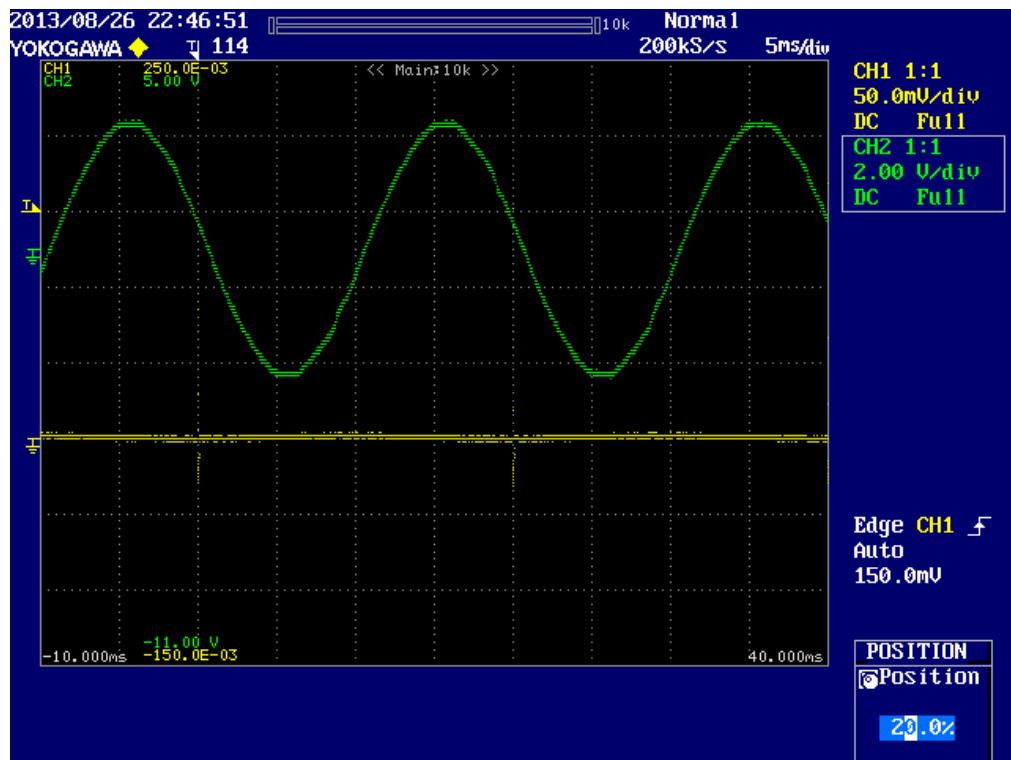


Diagramm 2: Gate-Impuls bei Steuerwinkel = 180°

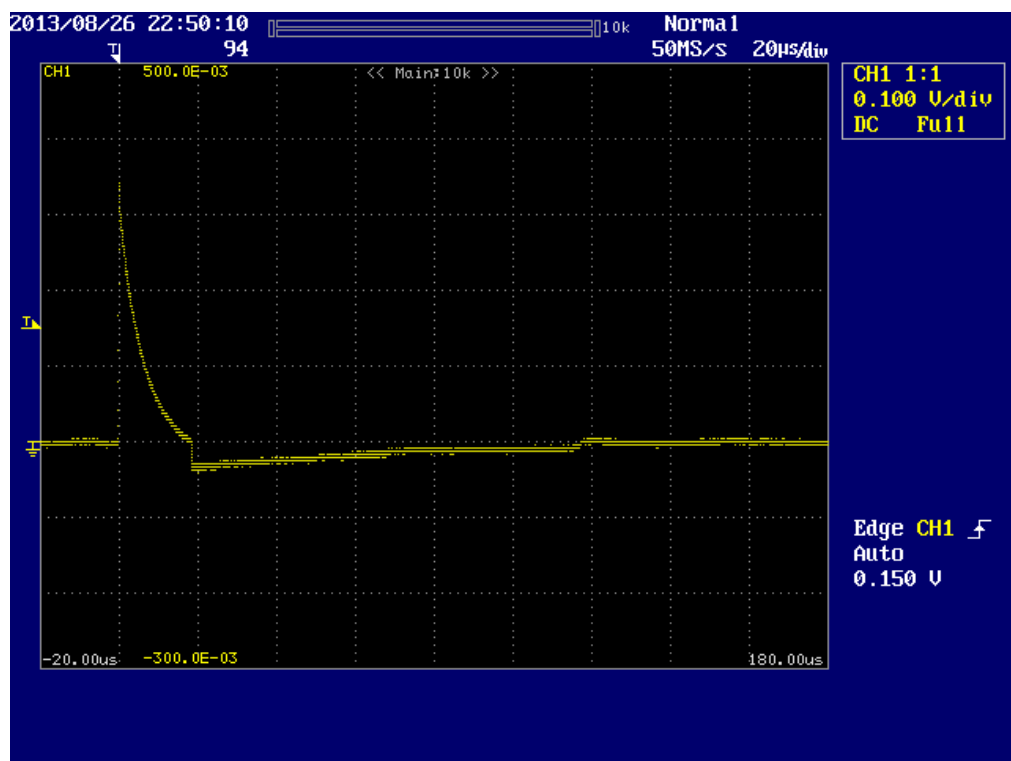


Diagramm 3: Gate-Impuls

Diese Abbildung zeigt den genauen TCA 785 erzeugenden Zündimpuls.

5 Phasenanschnittsteuerung

Die Phasenanschnittsteuerung ist eine Methode zur Leistungsregelung elektrischer Verbraucher, die mit Wechselspannung betrieben werden. Typische Anwendungen sind Dimmer und die Drehzahlregelung von Wechselstrommotoren. Sie stellt eine Form der Pulsweitenmodulation (PWM) dar.

5.1 Funktion der Phasenanschnittsteuerung

Thyristoren und Triacs mit ihren Schalteneigenschaften können zum kontinuierlichen Verändern von Lastströmen verändert werden, sofern man den Strom periodisch ein- und ausschaltet und das Verhältnis zwischen Zündverzugszeit t_z und Stromflusszeit t_i (Ein- und Ausschaltzeit) ändert.

In der Wechselstromtechnik unterscheidet man im Wesentlichen zwischen der Phasenanschnittsteuerung und der Vollwellensteuerung.

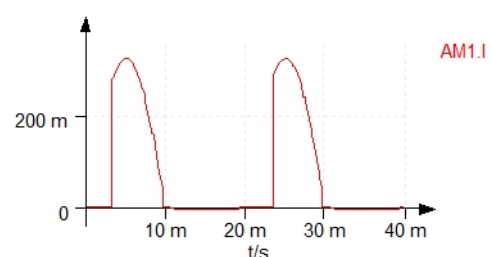
Während der Phasenanschnittsteuerung wird der Stromfluss durch einen Thyristor gesteuert. Es wird nur ein Teil der Halbwelle einer sinusförmigen Wechselspannung genutzt. Nach dem Nulldurchgang der Wechselspannung leitet der Thyristor den Strom so lange nicht, bis er einen Zündimpuls erhält. Ab diesem Zeitpunkt wird der Verbraucher mit Energie bis zum nächsten Nulldurchgang versorgt. Je später der Thyristor gezündet wird, desto geringer ist die mittlere Leistung.

Die Zündverzögerungswinkel φ_z ist der Winkel, den der Zeiger der Wechselspannung vom Augenblick der Zündung ab dem Spannungsnulldurchgang bis zum Schalten des Thyristors durchläuft. Der Stromflusswinkel φ_i ergänzt den Zündwinkel φ_z immer zu 180° einer Netzhalbperiode. Verschiebt man die Zündimpuls in der Phase, so kann der Stromflusswinkel φ_i größer oder kleiner gemacht werden. Damit ändert sich der Effektivwert des Laststromes I_L und die elektrische Leistung im Verbraucher.

Stromeffektivwert und Effektivwert der Spannung:

Der Stromeffektivwert lässt sich wie folgt berechnen:

$$u_{eff} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T \hat{u}_s^2 (\sin \omega t)^2 dt}$$



Simulationsparameter: Netzfrequenz 50Hz, T=20ms, Netzspannung 230V, Steuerwinkel 60°, R=1kΩ, t₀=10/3ms

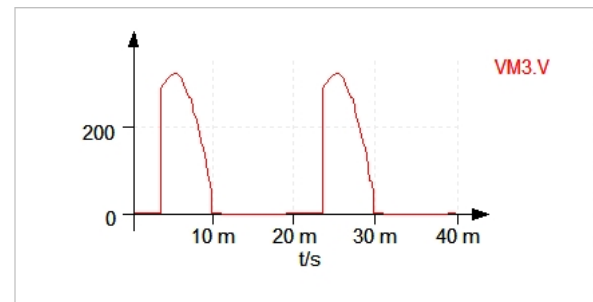
$$\int \sin^2(\omega t) dt = \frac{t}{2} - \frac{1}{4\omega} \sin(2\omega t) + \text{const}$$

$$u_{\text{eff}} = \hat{u}_s \sqrt{\frac{1}{T} \int_{t_0}^{T/2} \left(\sin 2\pi \frac{t}{T} \right)^2 dt} = \hat{u}_s \sqrt{\frac{1}{4} \left(1 - 2 \frac{t_0}{T} + \frac{1}{2\pi} \sin 4\pi \frac{t_0}{T} \right)} = 133V$$

Der Effektivwert der Spannung lässt sich wie folgt berechnen:

$$i_{\text{eff}} = \frac{u_{\text{eff}}}{R} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T \hat{i}_s^2 (\sin \omega t)^2 dt}$$

$$i_{\text{eff}} = \frac{u_{\text{eff}}}{R} = \frac{133V}{1k\Omega} = 133mA$$



Phasenanschnittsteuerung:

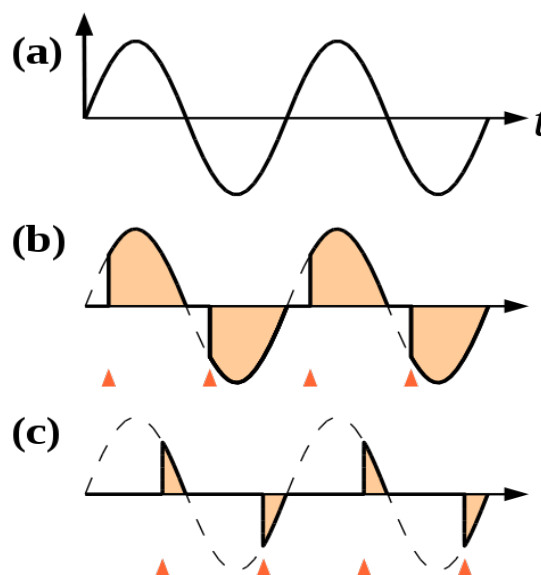


Abbildung 5- 1: Prinzip der Anschnittsteuerung

- (a) Netzspannung als Funktion der Zeit
- (b) Ausgangsspannung bei hoher Leistung
- (c) Ausgangsspannung bei niedriger Leistung

Die orangenen Pfeile zeigen an, wann der Triac gezündet wird.

Für kapazitive Lasten sind Phasenanschnittsteuerungen wegen des plötzlichen Spannungsanstiegs nicht geeignet, dafür werden Phasenabschnittsteuerungen eingesetzt.

Hingegen sind Phasenabschnittsteuerungen nicht für induktive Lasten geeignet (Spannungsspitze beim Abschalten des Stromes).

Vorteile: Sehr geringer Leistungsverlust; Einfacher und kleiner Aufbau und weniger störanfällig; Frequenz des Laststromes gleich der Netzfrequenz

Nachteile: Funkempfangsstörungen und abrupte Stromstöße im Netz durch die Aus- und Einschaltvorgänge je Halbwelle; Fehlanzeige von Zählern und Drehspulinstrumenten, da der Laststrom keine Sinusform mehr besitzt

Thyristoren nutzen nur eine Halbwelle der Wechselspannung. Soll auch die zweite Halbwelle genutzt werden, dann muss entweder ein anderes Bauelement (Triac) benutzt werden, oder bei hohen Leistungen werden zwei Thyristoren gegengleich parallel geschaltet.

5.1.1 Vertikalsteuerung

Die Vertikalsteuerung wird so bezeichnet, weil die Amplitude (Momentanwert) der Wechselspannung vertikal angehoben wird, bis eine Zündung des Leistungshalbleiters erfolgt.

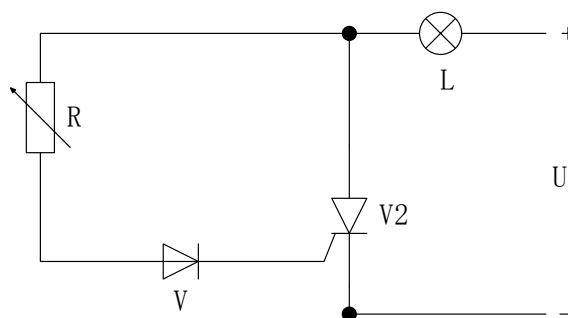


Abbildung 5- 2: Vertikalsteuerung

Nach der Reihenschaltung von Widerstand R und Diode V1 wird der der Kathodenanschluss von V1 mit dem Gateanschluss von V2 verbunden. Weiterhin besteht eine Verbindung zwischen R und dem Anodenanschluss von V2. Mit R kann der Zündverzögerungswinkel φ_z im Bereich von 0-90° nach jedem positiven Nulldurchgang eingestellt werden.

Weil der Widerstand R sehr viel größer als der Diodendurchlasswiderstand und der Widerstand zwischen Gate und Kathode ist, ist der Momentanstrom $i_G = \frac{u}{R}$ (u bezeichnet den Momentanwert von Versorgungsspannung). Wenn u nach dem positiven Nulldurchgang zunehmend ist, steigert sich der Gatestrom i_G . Und wenn der Gatestrom i_G größer als Zündstrom i_{GT} ist, leitet V2 und der Zündstrom i_{GT} sinkt auf 0. Weil die Zündschaltung und der Hauptstromkreis eine gleiche Netzspannung benutzen, müssen sie synchronisch sein.

Alle negativen Halbwellen werden vom Thyristor vollständig gesperrt. Diode V1 schützt den Gate-Anschluss G, um negative Überspannung zu beseitigen.

Vorteile: Die Zündung erfolgt ohne aufwendigen Impulsgeber über den Spannungsfall an einem Widerstand; Einfacher Aufbau

Nachteile: Der Zündwinkel φ_z ist nur von ca. 0-90° einstellbar, da in der ersten Hälfte der Halbwelle durch das Erreichen der mindestnotwendigen Spannungsamplitude der Thyristor in jedem Fall bereits gezündet wird. Die Schaltung lässt sich auf keinen Fall auf den Nullpunkt herunterregeln, da der Stromflusswinkel φ_i mindestens 90° beträgt ($\varphi_z + \varphi_i = 180^\circ$).

Einsatz: Durch die stark eingeschränkte Aussteuermöglichkeit kaum praktische Verwendung. Der Zündstrom wird durch die Temperatur beeinflusst, führt zu Leiten des Thyristors nicht stabil.

5.1.2 Horizontalsteuerung

Bei der Horizontalsteuerung werden Zündimpulse mit Hilfe eines RC-Phasenschiebers theoretisch von 0-180° zeitverzögert zur Netzhalbwellen horizontal verschoben. Da sowohl bei der positiven als auch bei der negativen Halbwelle Zündverzögerungswinkel bis zu 180° möglich sind, kann elektrische Leistung quasi von 0-100% gesteuert werden.

Im Wechselspannungsbereich eignen sich meist Schaltungen mit Triacs, da man hier kostengünstig und mit wenig Bauteilen Schaltungen zur Ansteuerung von Licht, aber auch Drehzahlregler o.ä. aufbauen kann.

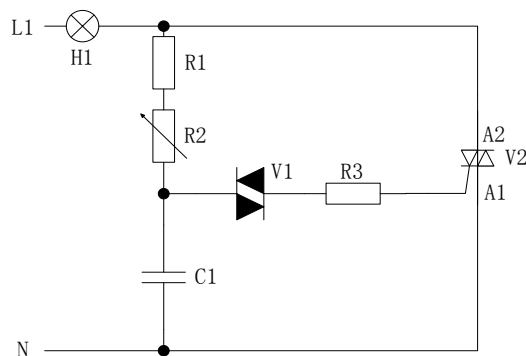


Abbildung 5- 3: Horizontalsteuerung

Zur Zündung von Triacs kann eine Schaltung nach **Abbildung 5- 3** benutzt werden, die bei der Helligkeitssteuerung von Glühlampen (Dimmer) angewendet wird. R1, R2 und C1 bilden einen Phasenschieber. Der über einen veränderlichen Vorwiderstand an der Wechselspannung u liegende Kondensator C1 wird in jeder Halbperiode aufgeladen. Je niederohmiger R2 eingestellt wird, desto schneller möchte sich C1 auf die

Durchbruchspannung des Diacs aufladen. Wenn die Kondensatorspannung u_C den Wert der Kippspannung U_{BO} des Diacs V1 überschreitet, entlädt sich der Kondensator über die Gate-Anoden-Strecke des Triacs V2 und zündet diesen durch den Steuerstrom i_G . Wie in **Abbildung 5- 4** dargestellt, kann durch Verändern des Widerstand R2 eine Verschiebung der Zündimpulse erreicht werden. V2 wird gezündet und schneidet die an A2/A1 liegende Halbwelle an, sodass H1 von der übrigen Halbwelle mit Strom versorgt wird.

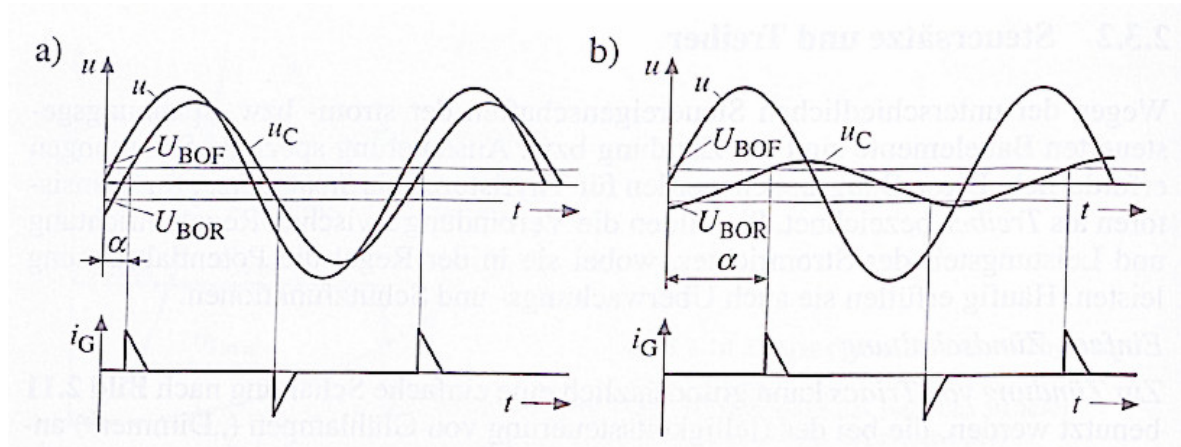


Abbildung 5- 4: Zeitlicher Verlauf der Systemgrößen von Horizontalsteuerung
a: $R2=0\Omega$ b: $R2=R2_{\max}$

Am Schleifer von R2 wird abwechselnd eine positive und eine negative Spannung, welche bezogen auf A1, messbar ist. R3 begrenzt die Höhe des Kondensator-Entladestromes. Der Spannungsfall entsteht zeitverschoben aber synchron zur Netzspannung am Triac.

Vorteile: Einfacher und preiswerter Aufbau, Leistungsbereich mit integrierten Ansteuerbausteinen (TCA 785) von 0-100% steuerbar.

Nachteile: Funkempfangsstörungen durch den 100Hz-Schaltbetrieb.

Einsatz: vorwiegend für Lichtsteuerungen (Dimmer), Drehzahlsteuerungen von Gleich-, Wechsel- und Drehstrommaschinen aller Art, (z.B. Heimwerker- und Haushaltsgeräte)etc.

5.2 Inbetriebnahmevorschriften

5.2.1 Funktion und Inbetriebnahme des Übungsmodells

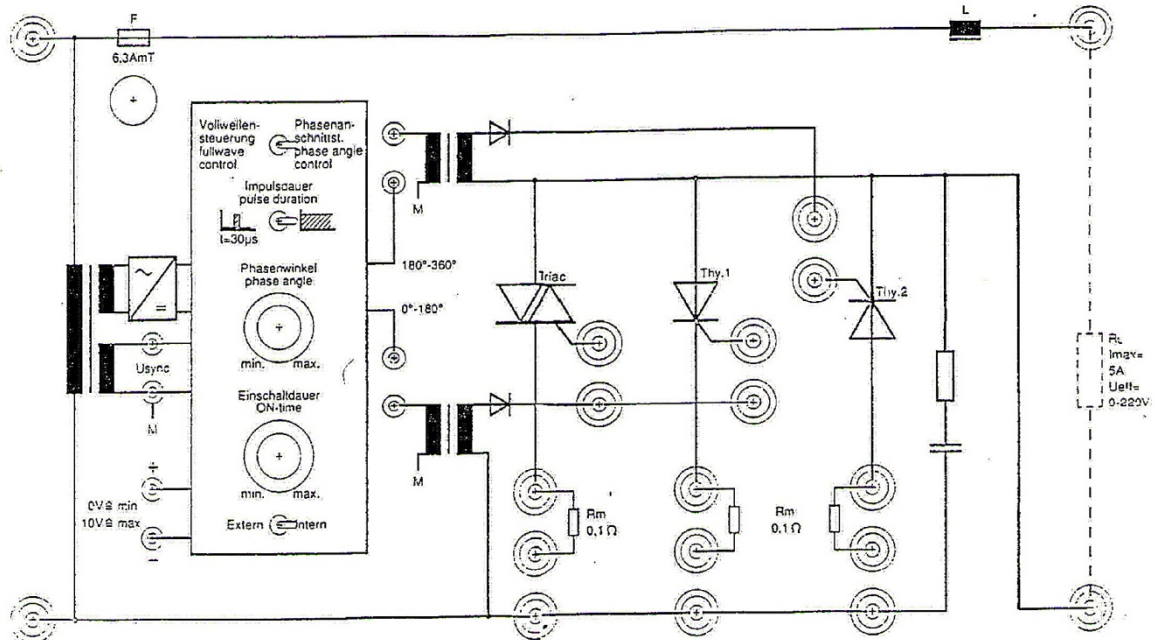


Abbildung 5- 5:Übungsmodell

Unser Übungsmodell besteht im Wesentlichen aus einem Steuerteil und den drei Leistungshalbleitern.

Als Leistungshalbleiter wurden ein Triac und zwei P-Gate-Thyristoren ausgewählt. Die Belastbarkeit der Leistungshalbleiter ist mit ca. 10A für alle hier aufgeführten Messungen ausreichend bemessen.

Am Simulationsmodell ist sowohl für die Einstellung des Phasenwinkels bei der Phasenschnittsteuerung als auch für die Festlegung der Einschaltdauer bei der Vollwellensteuerung ein extra Potentiometer zur Aussteuerung vorgesehen, welches bei der entsprechenden Schaltstellung des obersten Umschalters aktiv wird.

Mit dem zweiten Schalter „Impulsdauer“ kann die Dauer des Zündimpulses von $t=30\mu s$ auf Dauerimpuls umgestellt werden.

Mit dem „Extern-Intern“ – Wahlschalter kann der Zeitpunkt der Zündung entweder über die eingebauten Potentiometer (Intern) oder über ein analoges 0-10V-Signal extern, z.B. von einer SIMATIC-Baugruppe o.ä. eingespeist werden.

Zwischen dem Massepotential der externen Steuerung muss allerdings Verbindung zur Masse des Übungsmodells hergestellt werden !

Der Synchron Eingang U_{sync} dient als Referenzspannung (Vergleichsspannung) bei Messungen, um die ermittelten Spannungs- und Stromverläufe zeitgleich zur Netzspannung betrachten zu können.

Zur zeitgleichen Betrachtung ist allerdings am Zweistrahloszilloskop ein gemeinsamer Bezugspunkt erforderlich !

Die beiden Ausgänge 0° - 180° und 180° - 360° ermöglichen die getrennte Ansteuerung der positiven bzw. negativen Netzhalbwellen.

Zur Ansteuerung des Triac werden beide Ausgänge gemeinsam benötigt. Beachten Sie dabei, dass die Ausgänge nur über einen Zündübertrager an das Gate des Triac angelegt werden dürfen, da sonst durch Spannungsverschleppung die Zündübertrager zerstört werden können !

Induktive Zündübertrager mit Schutzdioden sorgen für die galvanische Trennung von Steuer- und Laststromkreis.

An den Ausgängen der Zündübertrager keine leitende Verbindung zueinander herstellen !

Die beiden Thyristoren ermöglichen über die beiden Steuerausgänge des TWA 785 die getrennte Ansteuerung beider Netzhalbwellen, wie sie beim Triac sowieso möglich ist.

Der TCA 785 liefert ausschließlich positive Zündimpulse. Deshalb ist die Antiparallelschaltung in unserem Übungsmodell mit zwei P-Gate-Thyristoren ausgerüstet.

Die Leistungshalbleiter sind mit einer flinken Sicherung 6,3A abgesichert.

Verwenden Sie beim Sicherungswechsel den gleichen Nennwert mit der entsprechenden Auslösecharakteristik !

Alle Leistungshalbleiter sind mit einer TSE-Schutzbeschaltung versehen.

Sie können also auch induktiv belastet werden !

Ein LC-Filter sorgt für die entsprechende Funkentstörung.

Diese ist auch für gemischt ohmsch/induktive Belastung ausreichend !

Die eingebauten Messwiderstände $R_m=0,1\Omega$ lassen mit dem Oszilloskop eine indirekte Strommessung ohne äußere Zusatzbeschaltung zu.

Bei zeitgleichen Oszilloskop-Messungen muss jedoch ein gemeinsamer Massebezugspunkt vorhanden sein !

Die Steuerung, mit der sowohl die Phasenanschnitt- als auch die Vollwellensteuerung realisierbar ist, wurde mit dem integrierten Ansteuerbaustein TCA 785 aufgebaut.

Sie ermöglicht somit die Zündung von Thyristoren und Triacs bzw. Einer Antiparallelschaltung von Thyristoren (Zündmöglichkeit bis 360°) über den kompletten Leistungsbereich von 0-100% Aussteuerbereich.

5.3 Phasenanschnittsteuerung mit Thyristor

Da bei der Phasenanschnittsteuerung mit Thyristor nur eine Halbwelle der Netzspannung angesteuert werden kann, die andere Halbwelle jedoch durch den Thyristor gesperrt wird, bezeichnet man diese Schaltung auch als „Vollgesteuerte Einpuls-Mittelpunktschaltung M1C“ (M= Mittelpunktschaltung, 1= einpulsig, C= vollgesteuert).

Bei der Phasenanschnittsteuerung unterscheiden wir im Leistungsteil nun verschiedene Arten der Belastung. Die Last kann rein ohmsche (Helligkeitssteuerung von Glühlampen) oder rein induktive (Glättungsdrossel) Last und gemischt ohmsch/induktive Last (Drehzahlsteuerung von Motoren) sein.

5.3.1 Digitale Simulation

Die Simulation ist eine Vorgehensweise zur Analyse von Systemen, die für die theoretische oder formelmäßige Behandlung zu komplex sind.

Anlass von Simulationen:

- Experimente am Originalsystem sehr aufwendig, teuer oder mit Gefahren verbunden wären
- Sehr komplexe oder in Funktion befindliche Systeme für reale Experimente nicht zugänglich sind
- Noch nicht existierende Systeme in Entwicklungsstadium untersucht werden sollen

Ziele von Simulationen:

- Gewinnung von Erkenntnissen über die Systemeigenschaften, insbesondere in Grenzbereichen des Betriebs und unter erschwerten Bedingungen
- Erfassung von Systemgrößen, die am realen System nicht zugänglich sind
- Optimierung der Systemparameter unter vorgegebenen Kriterien
- Untersuchung der Auswirkungen äußerer Einflüsse
- Analyse von Störungen und ihrer Folgen

Simulation als Entwicklungshilfsmittel ist von großer Bedeutung. Durch Simulationen können wesentliche Kosten und Zeit einsparen werden.

5.3.1.1 Portunus

Portunus[®] ist eine Software zur Systemsimulation, die sich durch eine Vielzahl von Möglichkeiten zur Beschreibung des zu untersuchenden Systems, eine komfortable Nutzeroberfläche, die Kombination leistungsfähiger numerischer Algorithmen und leistungsfähige Schnittstellen zur Programmierung, Automatisierung sowie den Import und Export von Daten auszeichnet.

Mögliche Anwendungen von Portunus[®] reichen von Simulationen in der Elektro- und Elektroenergietechnik, Leistungselektronik und Antriebstechnik über thermische Berechnungen, Untersuchungen von Magnetkreisen bis hin zu Regelungen.

Hier wenden wir die Leistungselektronik an.

Zuerst ein neues Schema baut auf. Dann wählen Sie Bauelemente aus und verbinden sie die Bauelemente. Und die Bauelemente wird entsprechende Charakteristik und Steuersignal erteilen. Für Thyristor ist die Charakteristik Exponentialfunktion und ist die Steuersignal Zeitfunktion PWM. Weil Netzfrequenz 50Hz ist, muss Periode der PWM 0,02s sein, um die Zündimpuls und Hauptstromkreis zu synchronisieren. Und der Steuerwinkel wird 60° eingestellt.

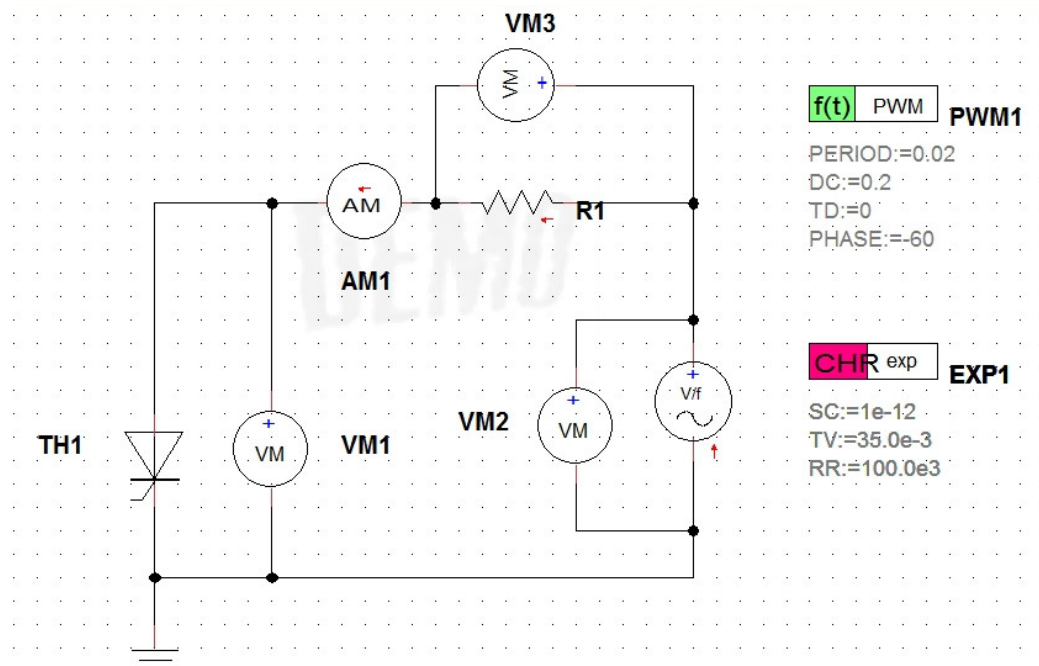


Abbildung 5- 6: Einstellungen digitaler Simulation

Zum Schluss wird die transiente Analyse durchgeführt.

Vergleichen wir nun den Spannungs- und Stromverlauf von rein ohmscher und rein induktiver Belastung:

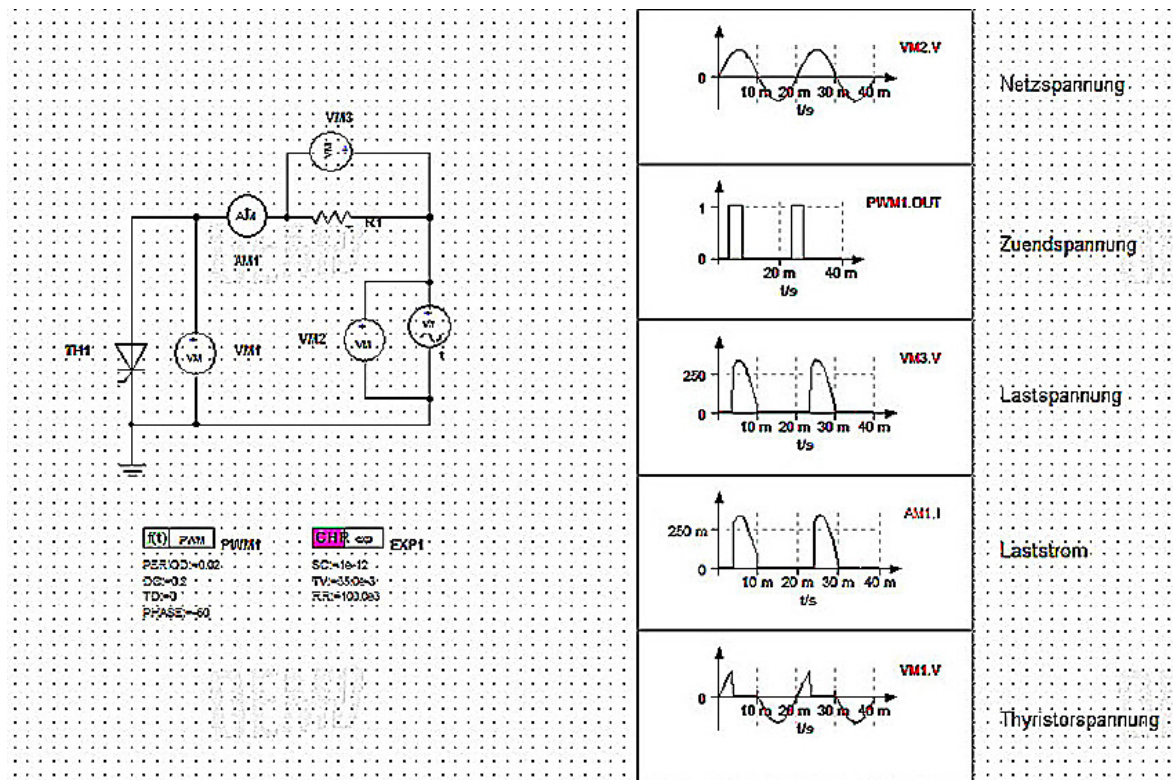


Abbildung 5- 7: Phasenanschnittsteuerung mit ohmscher Last

- Steuerwinkel α ist der Winkel, dass er von Anfangspunkt der Anodenspannung bis zum Arbeitspunkt des Zündimpulses ist.
- Während der negativen Halbwelle der Netzspannung sperrt der Thyristor bei ohm'scher Belastung. Vom positiven Nulldurchgang bis zum Arbeitspunkt des Zündimpulses ist der Thyristor auch gesperrt. In diesem Zustand entspricht der Thyristor einem öffnenden Schalter. Die Thyristorspannung ist gleich wie die Netzspannung.
- Wenn der Thyristor zündet, bleibt die Thyristorspannung bis zum nächsten Nulldurchgang Null. Im gezündeten Zustand entspricht der Thyristor einem geschlossenen Schalter. Der Thyristor verbleibt nach dem Zünden in einem niederohmigen Zustand. Nun ist die Thyristorspannung annähernd Null.
- Wenn der Thyristor gezündet wird, steigt der Stromfluss bei ohmscher Last sprunghaft auf den zugehörigen Augenblickswert an. Die Verläufe von Laststrom und -spannung sind ähnlich. Weil der Thyristor während der negativen Halbwelle der Netzspannung nicht leitend ist, sind die Lastspannung und -strom Null.
- Im Nulldurchgang der Spannung ist der Strom bei ohm'scher Belastung Null.

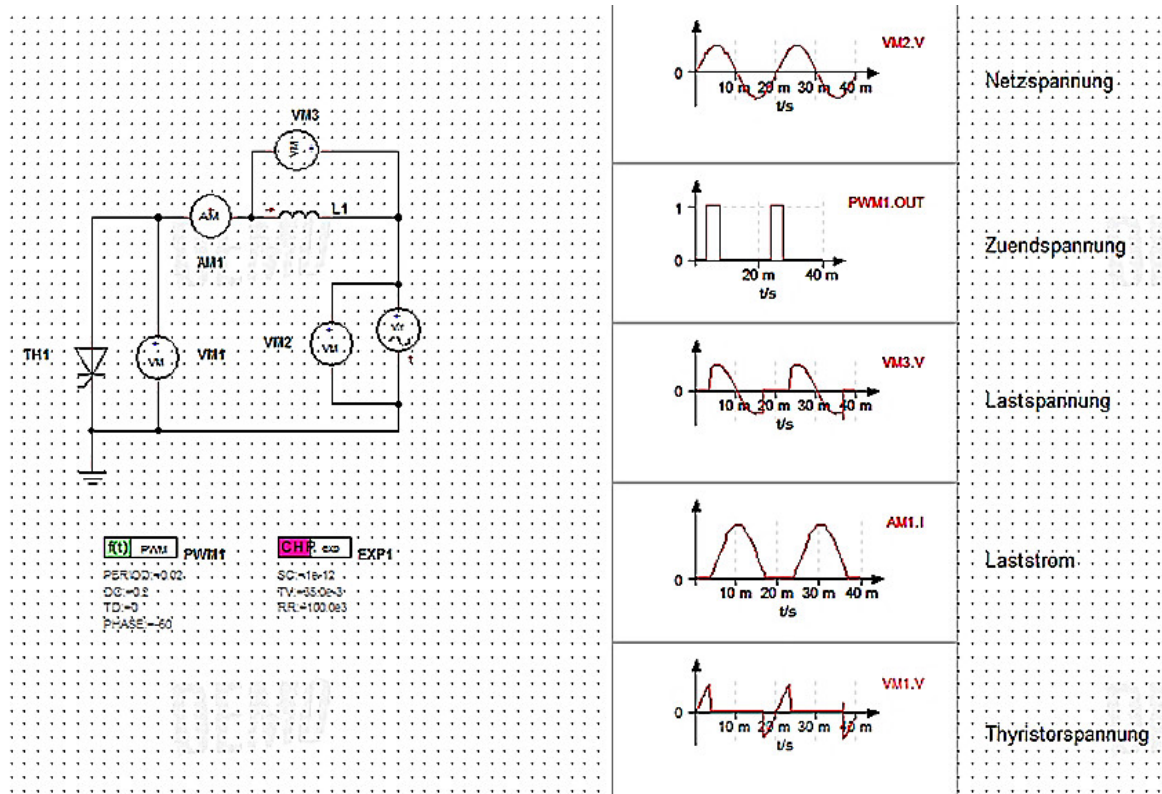


Abbildung 5- 8: Phasenanschnittsteuerung mit induktiver Last

- Während der negativen Halbwelle der Netzspannung leitet der Thyristor bei induktiver Last weiterhin, bis der Haltestrom unterschritten wird. Im gezündeten Zustand ist die Thyristorspannung annähernd Null.
- Wenn der Thyristor gezündet wird, steigt der Stromfluss bei induktiver Last von Null an. Dabei steigt der Lastspannung sprunghaft auf den zugehörigen Augenblickswert an.
- Im Nulldurchgang der Spannung erreicht der Strom bei induktiver Last seinen Höchstwert.
- Die Ausgangsspannung zeigt bei rein induktiver Last gleich große positive und negative Spannungs-Zeit-Flächen.

Die Ursache des unterschiedlichen Verhaltens liegt in der Selbstinduktionsspannung bzw. der Energiespeicherfähigkeit der Induktivität. Beim Aufbau des magnetischen Feldes wirkt die Induktionsspannung dem ansteigenden Strom entgegen, sodass dieser von Null verzögert ansteigt. Im Scheitelwert des Stromes kehrt die Induktionsspannung ihre Richtung um. Sie treibt während der negativen Halbwelle der Netzspannung den Strom in gleicher Richtung weiter.

5.3.2 Versuch 3

5.3.2.1 Zielsetzung

Der Versuch soll zum Erwerb von Kenntnissen, Fähigkeiten und Fertigkeiten zu folgenden Schwerpunkten beitragen:

- Erhalten der Oszillogramme von Thyristorspannung, Zündspannung, Lastspannung und Laststrom bei rein ohm'scher Belastung, rein induktiver Belastung und gemischt ohm'scher/induktiver Belastung
- Vergleichen theoretische Verläufe mit praktische Verläufe
- Kennenlernen der Phasenanschnittsteuerung von unterschiedlichen Belastungen

5.3.2.2 Arbeitsplan

1. Verwenden Sie als ohmsche Last die Glühlampe geschaltet. Vergleichen Sie in jeder Messreihe die ohm'sche Glühlampenlast mit der induktiven Last eines Universalmotors.
2. Stellen Sie nun den obersten Umschalter auf „Phasenanschnittsteuerung“ ein.
3. Stellen Sie den Wahlschalter „Impulsdauer“ auf „ $t=30\mu s$ “ ein. Der Wahlschalter bleibt während der ganzen Messreihe unverändert.
4. Die unterste Wahlschalter steht in der Position „Intern“. Er bleibt während der Messung unverändert, da im Lehrgang keine analogen Eingabesignale verarbeitet werden.
5. Bestimmen Sie durch Drehen des Potentiometers „Phasenwinkel“ den in der Messreihe vorgegebenen Zündwinkel φ_z , indem Sie den Spannungsfall am Leistungshalbleiter U_{V1} mit Ihrem Oszilloskop sichtbar machen.
6. Achten Sie beim Oszilloskopieren unbedingt auf zeitgleiche Triggerung synchron zur Netzspannung !
7. Wählen Sie die Zeiteinstellung so, dass zwischen zwei und fünf Perioden auf dem Bildschirm sichtbar werden.
8. Bauen Sie die folgende Versuchsschaltung auf:

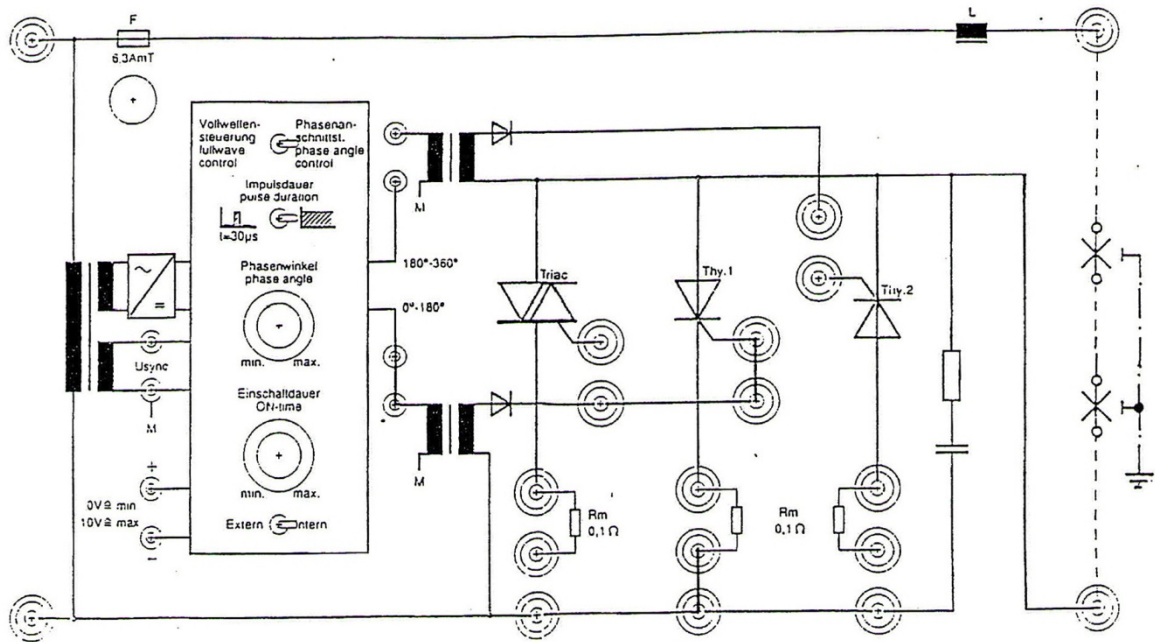


Abbildung 5- 9: Versuchsaufbau

5.3.2.3 Aufgabenstellungen

- 1) Nehmen Sie mit der Glühlampenlast (rein ohm'sche Last) folgende Oszillogramme auf:

Thyristorspannung U_{V1} (Y1) und Zündspannung U_Z (Y2) bei $\varphi_Z=60^\circ$
 Lastspannung U_{L1} und Laststrom I_{L1} bei $\varphi_Z=60^\circ$

Die Thyristorspannung wird direkt an den Anschlüssen A und K ermittelt. Und die Zündspannung wird direkt an den Anschlüssen G und K ermittelt. Die Lastspannung ist direkt an den Verbraucheranschlüssen zu ermitteln. Der Laststrom kann über den Messwiderstand R_m in der Schaltung indirekt sichtbar gemacht werden. Weil Lastspannung und Laststrom keine gemeinsamen Mess- bzw. Bezugspunkte besitzen, können die beiden Größen nicht gleichzeitig am Zweistrahloszilloskop sichtbar gemacht werden.

Der Übertrag beider Größen in ein Oszillogramm ist nur zeichnerisch, nicht aber messtechnisch möglich.

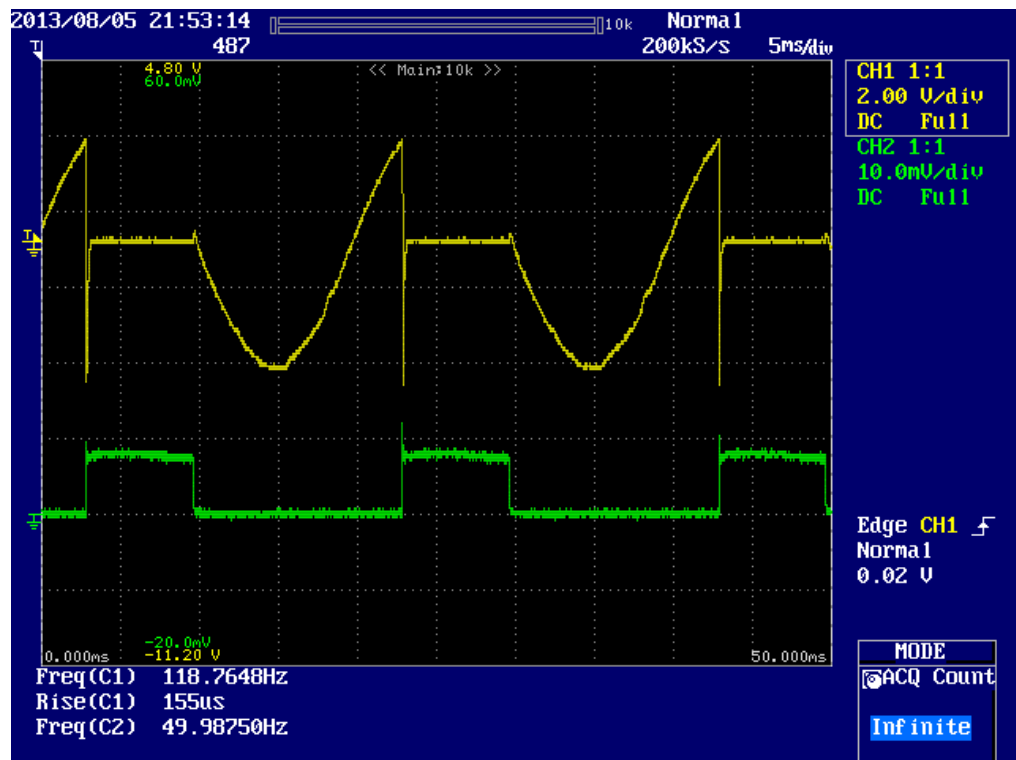


Diagramm 4: Thyristorspannung U_{V1} und Zündspannung U_Z bei $\phi_z = 60^\circ$

Die gelbe Linie zeigt die Thyristorspannung. Die grüne Linie zeigt die Zündspannung. Hier bei $\phi_z = 60^\circ$ leitet der Thyristor. Der Bereich von Zündpunkt bis zum Nulldurchgang ist der Phasenwinkel.

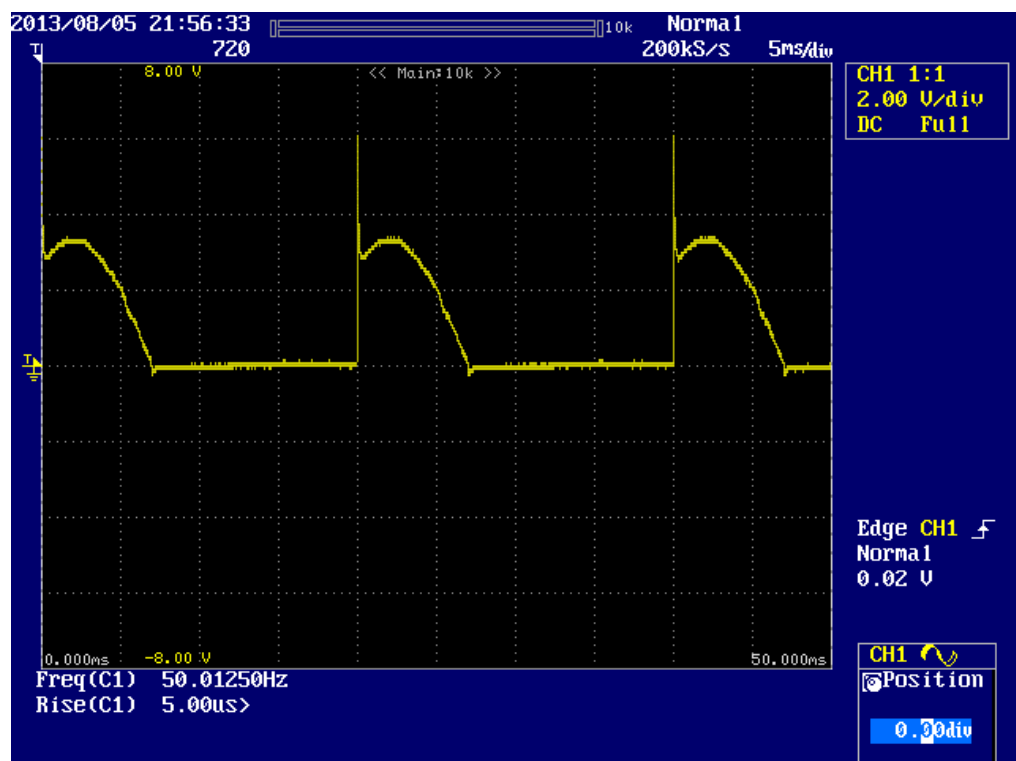


Diagramm 5: Lastspannung U_{L1} bei $\phi_z = 60^\circ$

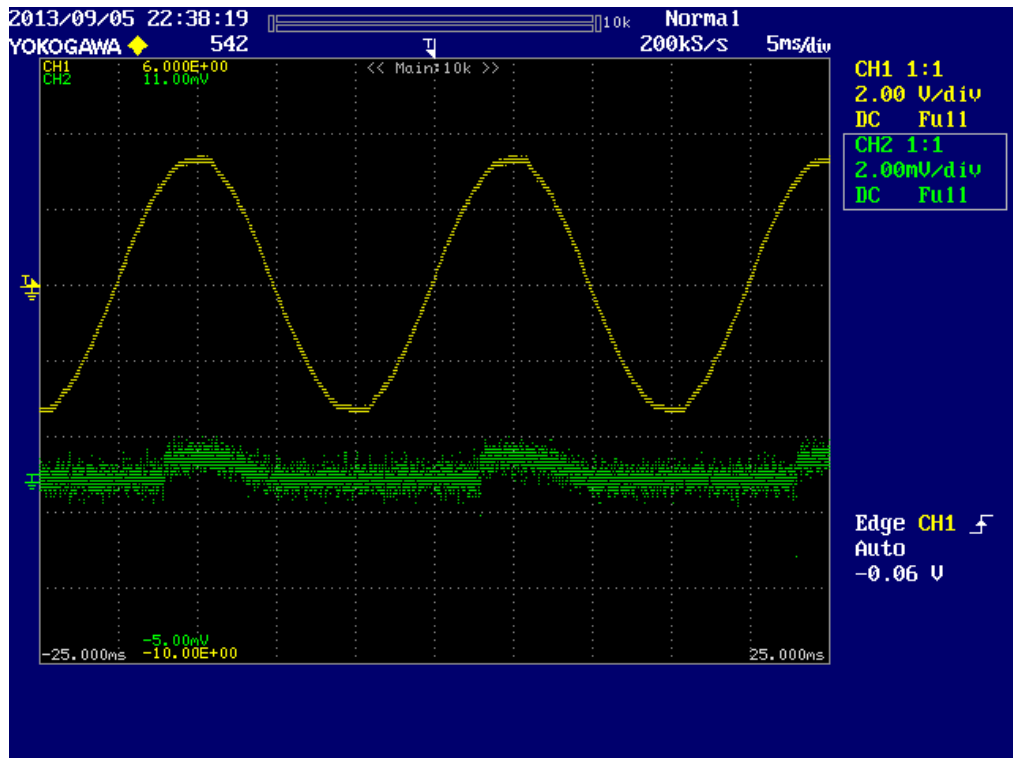


Diagramm 6: Netzspannung und Laststrom I_{L1} bei $\varphi_z=60^\circ$

Die gelbe Linie zeigt die Netzspannung. Und die grüne Linie zeigt die Laststrom.

Während der positiven Halbwellen hat der Thyristor eine positive Anodenspannung. Wenn er bei $\varphi=60^\circ$ eine Zündspannung gibt, leitet der Thyristor. Da der Thyristor nach dem Zünden niederohmig ist, ist die Spannung $U_{AK} \approx 0$. Und die Lastspannung $U_{L1} \approx U_{\text{Netz}}$. Der Laststrom $I_{L1} = \frac{U_{L1}}{R}$ (R ist Konstant.), deshalb ist die Oszillogramme von Lastspannung und Laststrom ähnlich. Bis zum Nulldurchgang schaltet der Thyristor aus. Während der negativen Halbwellen sperrt der Thyristor. Die Thyristorspannung ist gleich wie die Netzspannung. $\varphi_z + \varphi_i = 180^\circ$

- 2) Nehmen Sie mit der Glättungsdrossel (rein induktive Last) folgende Oszillogramme auf:

Thyristorspannung U_{V1} (Y2) und Zündspannung U_z (Y1) bei $\varphi_z=60^\circ$
 Lastspannung U_{L1} und Laststrom I_{L1} bei $\varphi_z=60^\circ$

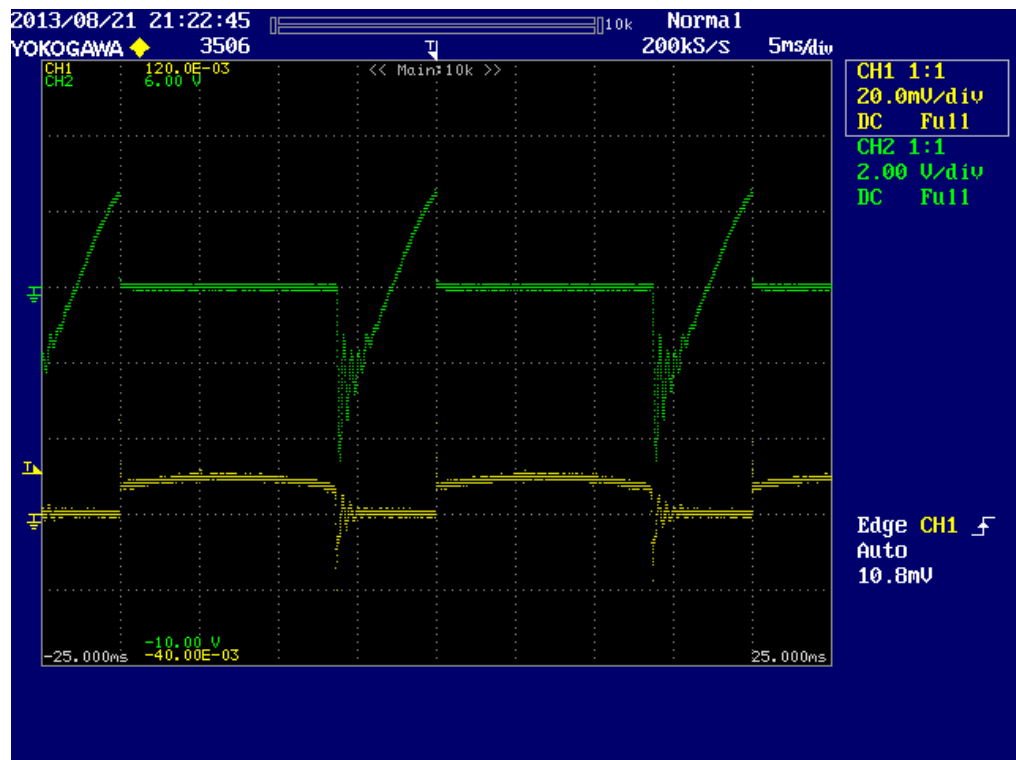


Diagramm 7: Thyristorspannung U_{V1} und Zündspannung U_Z bei $\varphi_Z=60^\circ$

Die grüne Linie zeigt die Thyristorspannung. Und die gelbe Linie zeigt die Zündspannung.

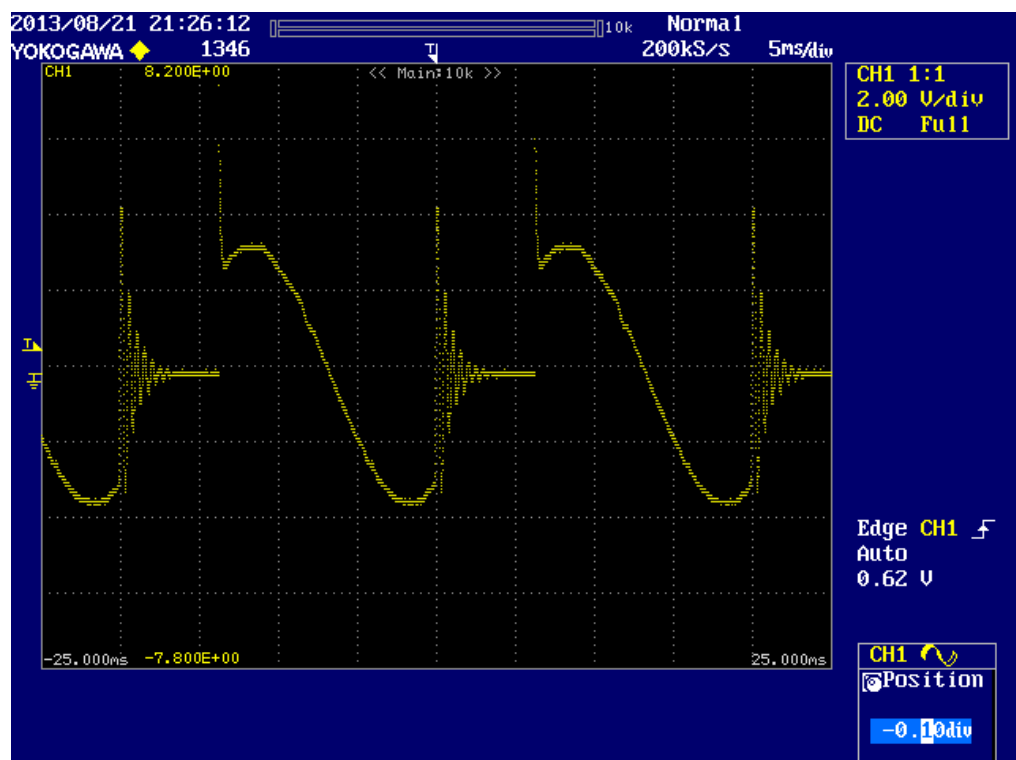


Diagramm 8: Lastspannung U_{L1} bei $\varphi_Z=60^\circ$

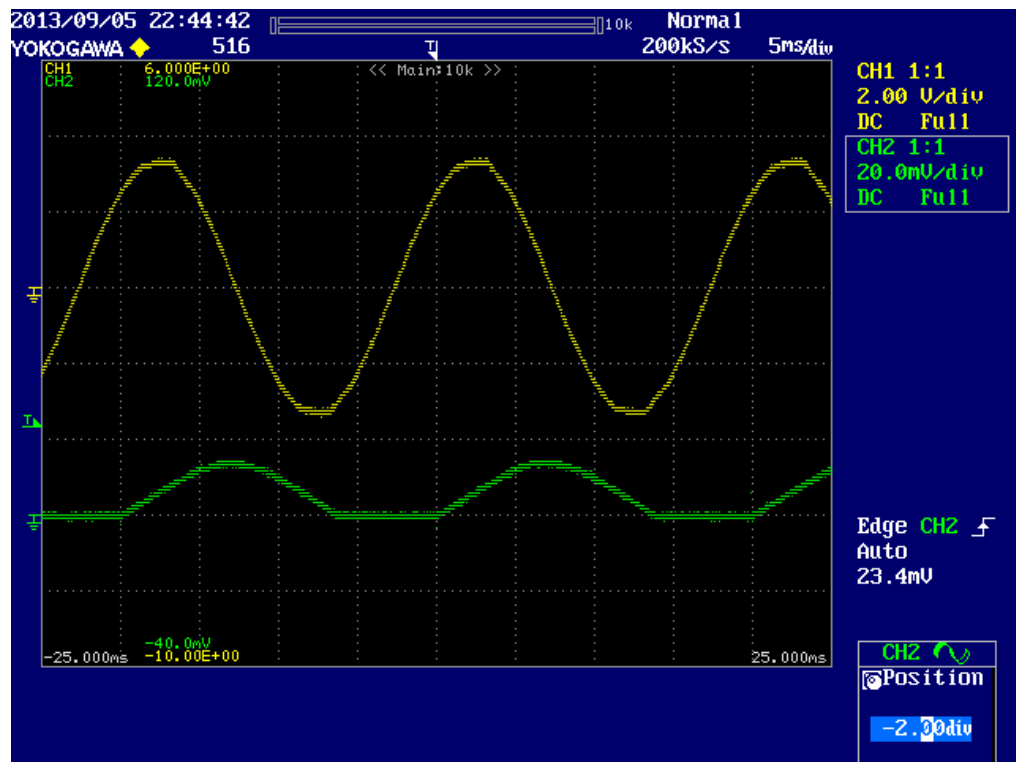


Diagramm 9: Netzspannung und Laststrom I_{L1} bei $\varphi_z=60^\circ$

Die gelbe Linie zeigt die Netzspannung. Und die grüne Linie zeigt den Laststrom.

Im Fall rein induktiver Belastung verläuft der Strom entgegengesetzt symmetrisch zum Spannungsnulldurchgang. Bis zum Nulldurchgang erreicht der Laststrom den Höchstwert.

- 3) Nehmen Sie mit der 100W-Universalmaschine (gemischt ohm'sche/induktive Last) folgende Oszillogramme auf:

Thyristorspannung U_{V1} (Y2) und Zündspannung U_z (Y1) bei $\varphi_z=60^\circ$
 Lastspannung U_{L1} und Laststrom I_{L1} bei $\varphi_z=60^\circ$

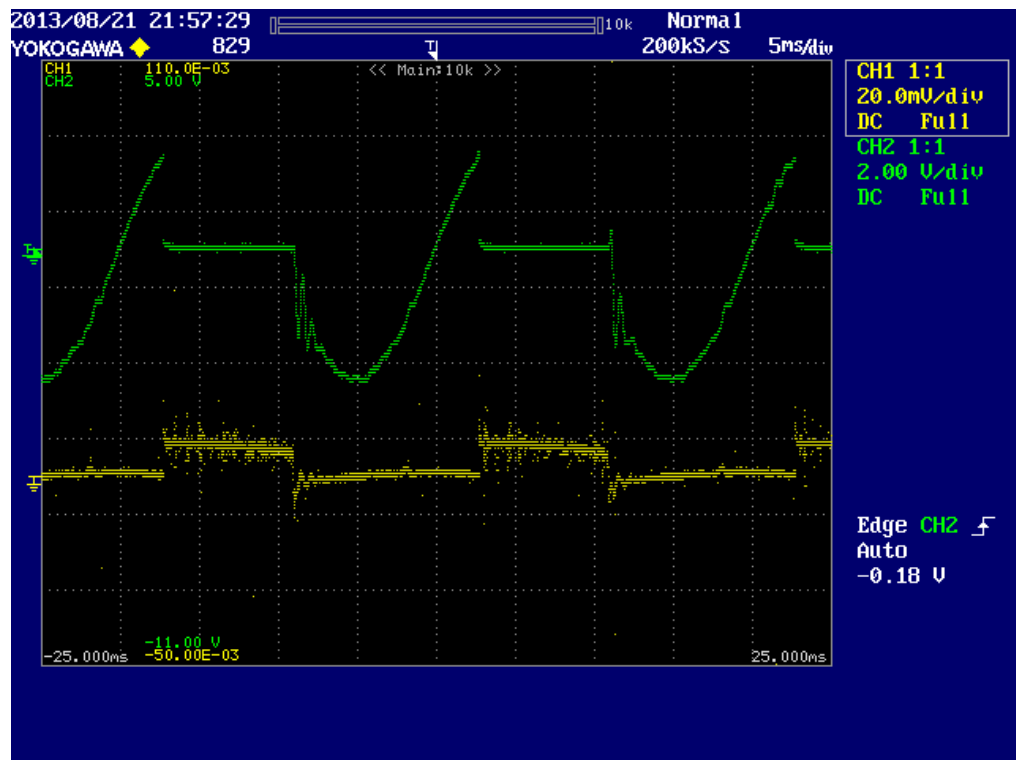


Diagramm 10: Thyristorspannung U_{V1} und Zündspannung U_Z bei $\varphi_Z=60^\circ$

Die grüne Linie zeigt die Thyristorspannung. Und die gelbe Linie zeigt die Zündspannung.

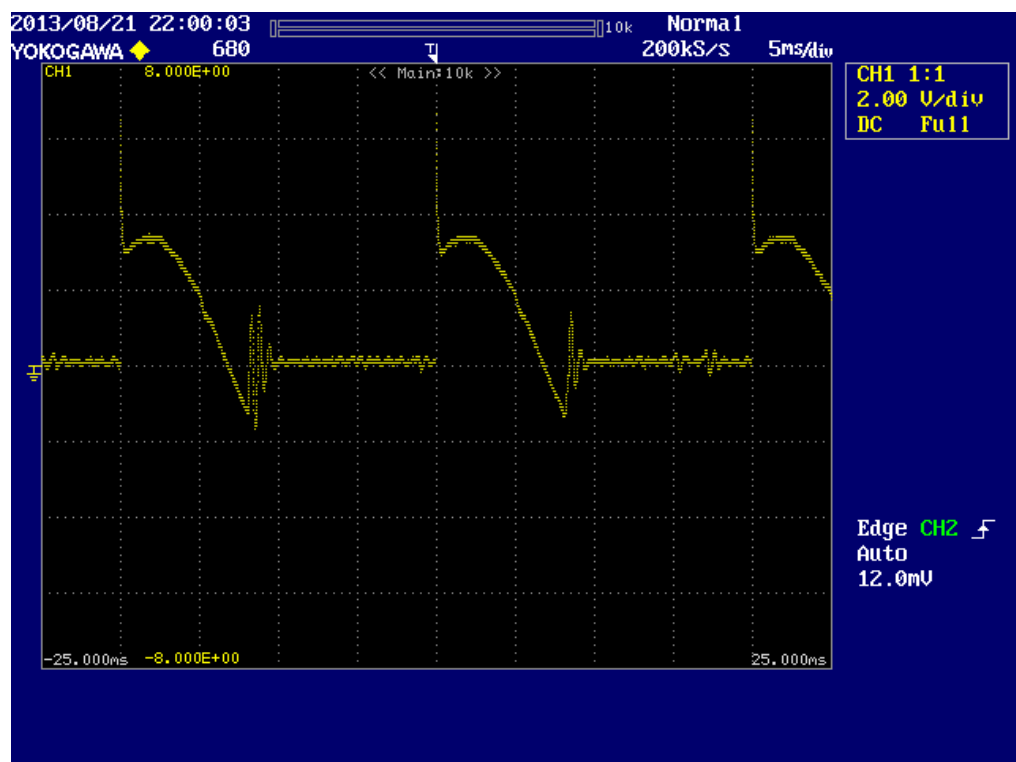


Diagramm 11: Lastspannung U_{L1} bei $\varphi_Z=60^\circ$

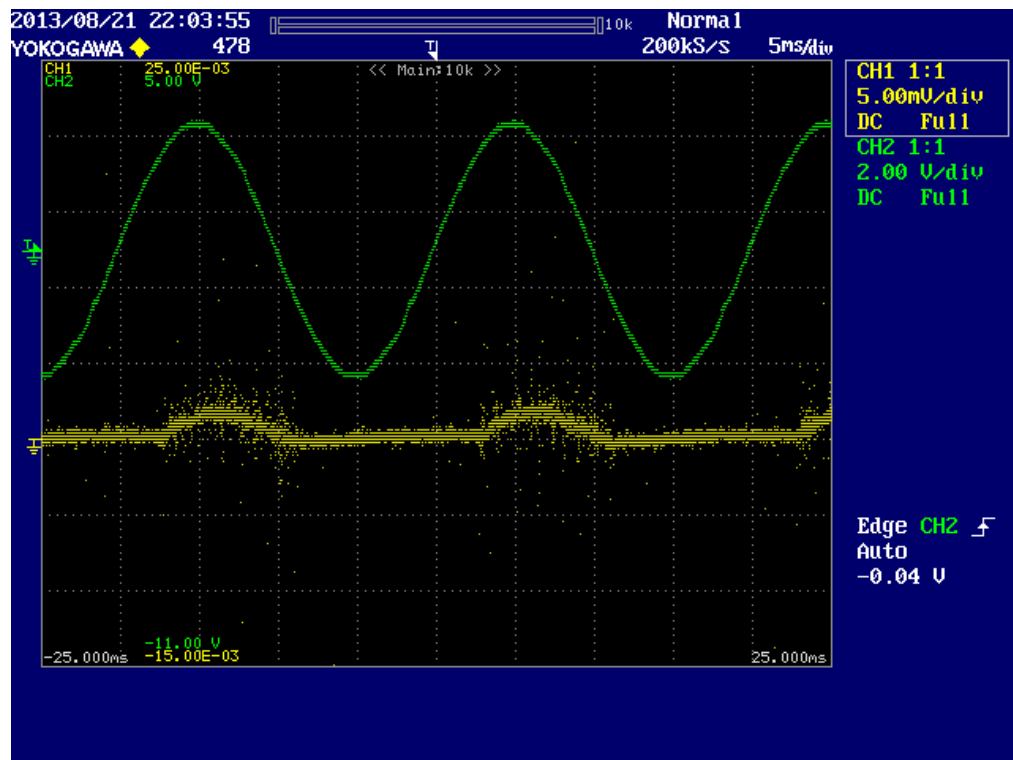


Diagramm 12: Lastspannung U_{L1} bei $\varphi_z=60^\circ$

Die gelbe Linie zeigt die Netzspannung. Und die grüne Linie zeigt die Laststrom.

Im Fall der gemischt ohmsch-induktiven Belastung fließt der Strom auch über den Spannungsnulldurchgang hinaus, weil die Induktivität bei positiver Spannung magnetische Energie aufnimmt, die sie dann bei negativer Spannung wieder abgibt, indem sie den Strom weiterrückt. Sowohl beim Laden als auch Entladen der Induktivität wird im Widerstand Energie umgesetzt. Der Verlauf des Gleichstroms $i_d(t)$ ist unsymmetrisch zum Spannungsnulldurchgang. Die Stromflussdauer vor dem Nulldurchgang ist länger als danach.

5.4 Phasenanschnittsteuerung mit Antiparallelschaltung zweier Thyristoren

Um beide Halbwellen der Netzspannung ansteuern zu können, muss bei der Ansteuerung mit Thyristor für jede Halbwellen ein Thyristor vorgesehen werden.

Diese Steuerung wird deshalb in der Leistungselektronik auch als „Vollgesteuerter Wechselstromsteller W1C“ (W= Wechselwegschaltung, 1= Einpulsig, C= Vollgesteuert) bezeichnet.

Diese Schaltung besteht aus zwei P-Gate-Thyristoren. Die Ansteuerung der Thyristor V1 für die positive Halbwelle erfolgt am Steuersatz von 0° - 180° . Die Ansteuerung der Thyristor V2 für die negative Halbwelle erfolgt am Steuersatz von 180° - 360° .

Wenn Sie also am Steuerpotentiometer an dem Modell einen Zündwinkel von z.B. $\varphi_z=60^\circ$ einstellen, führt der Zündbaustein diese Zündung symmetrisch für beide Halbwellen mit positiven Zündimpulsen durch.

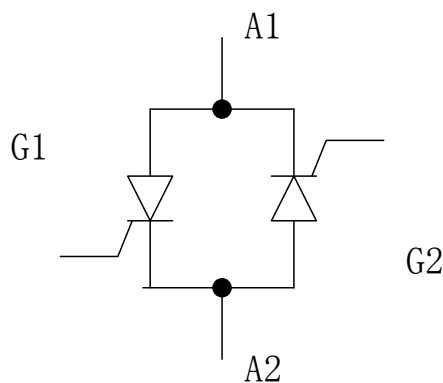


Abbildung 5- 10: Antiparallelschaltung von zwei Thyristoren

5.4.1 Versuch 3 (weitermachen)

5.4.1.1 Arbeitsplan

1. Verwenden Sie als ohmsche Last die Glühlampe geschaltet. Vergleichen Sie in jeder Messreihe die ohmsche Glühlampenlast mit der induktiven Last eines Universalmotors.
2. Stellen Sie nun den obersten Umschalter auf „Phasenanschnittsteuerung“ ein.
3. Stellen Sie den Wahlschalter „Impulsdauer“ auf „ $t=30\mu s$ “ ein. Der Wahlschalter bleibt während der ganzen Messreihe unverändert.
4. Die unterste Wahlschalter steht in der Position „Intern“. Er bleibt während der Messung unverändert, da im Lehrgang keine analogen Eingabesignale verarbeitet werden.
5. Bestimmen Sie durch Drehen des Potentiometers „Phasenwinkel“ den in der Messreihe vorgegebenen Zündwinkel φ_z , indem Sie den Spannungsfall am Leistungshalbleiter U_{V1} mit Ihrem Oszilloskop sichtbar machen.
6. Achten Sie beim Oszilloskopieren unbedingt auf zeitgleiche Triggerung synchron zur

Netzspannung !

7. Wählen Sie die Zeiteinstellung so, dass zwischen zwei und fünf Perioden auf dem Bildschirm sichtbar werden.
8. Bauen Sie die folgende Versuchsschaltung auf:

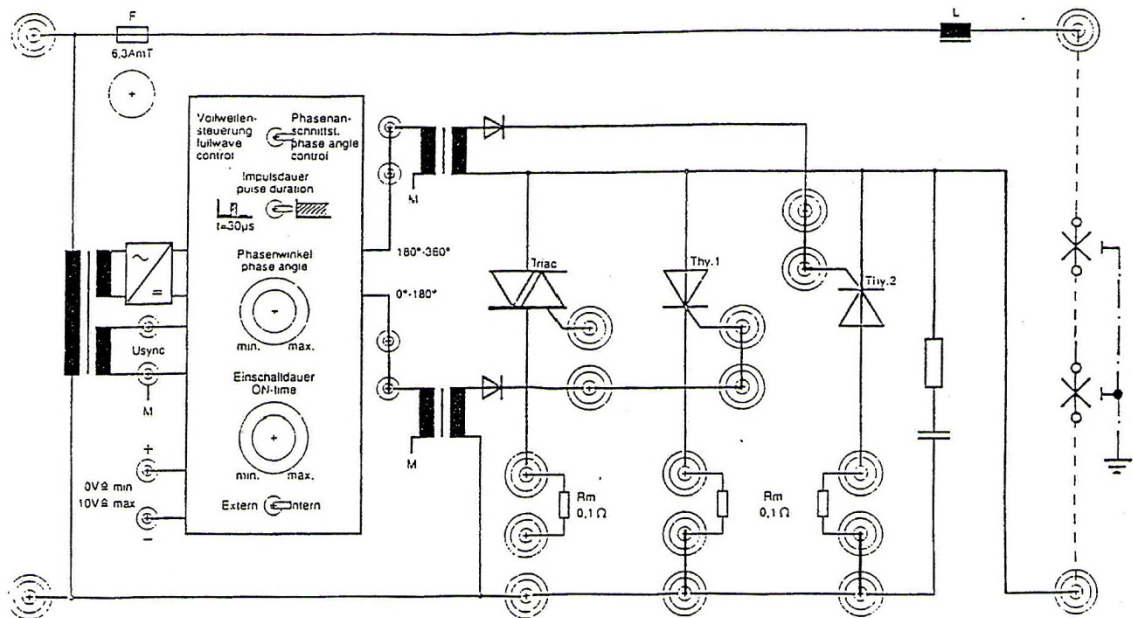


Abbildung 5- 11: Versuchsaufbau

5.4.1.2 Aufgabenstellungen

- 1) Nehmen Sie mit der Glühlampenlast (rein ohm'sche Last) folgende Oszillogramme auf:

Thyristorspannung U_{V1} (Y2) und Zündspannung U_Z (Y1) bei $\varphi_Z=60^\circ$
 Lastspannung U_{L1} und Laststrom I_{L1} bei $\varphi_Z=60^\circ$

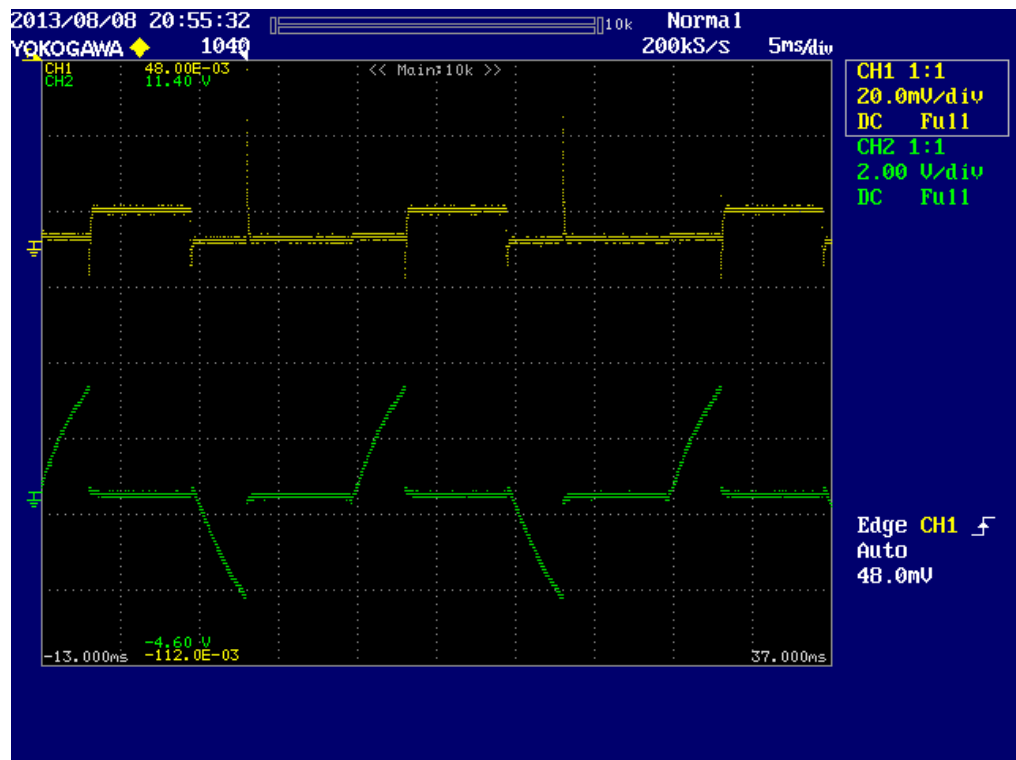


Diagramm 13: Thyristorspannung U_{V1} und Zündspannung U_Z bei $\varphi_Z=60^\circ$

Jede Halbwelle der Netzspannung wird der Thyristor bei $\varphi_Z=60^\circ$ gezündet. Die gelbe Linie zeigt die Zündimpulse und die grüne Linie zeigt die Thyristorspannung.

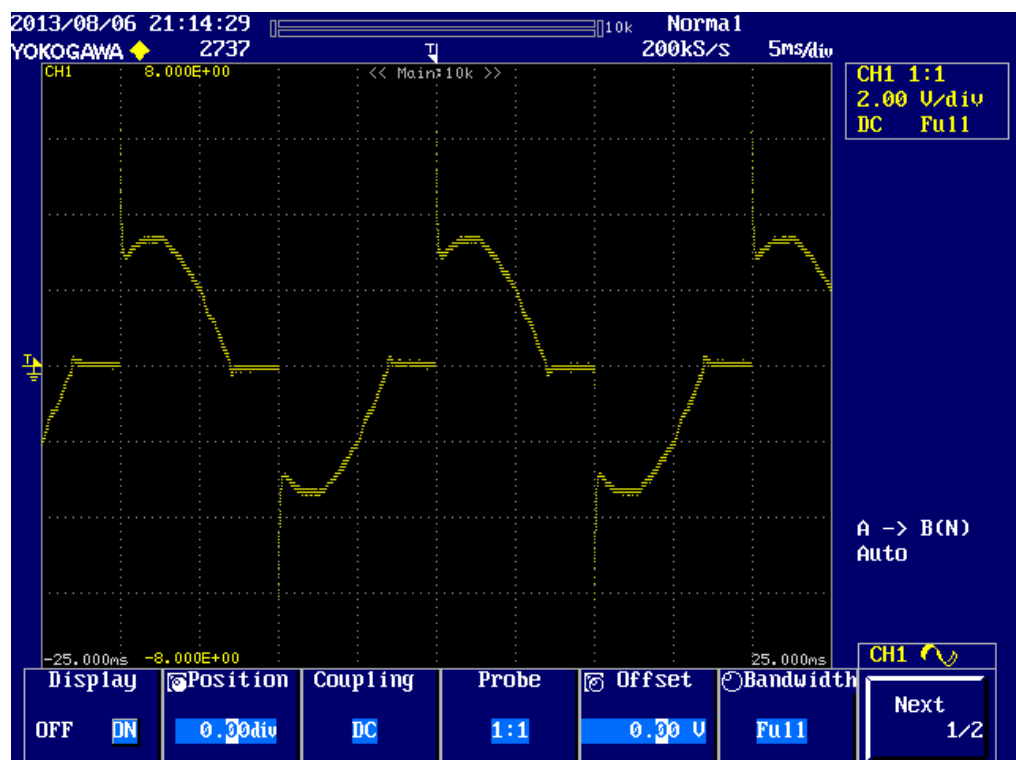


Diagramm 14: Lastspannung U_{L1} bei $\varphi_Z=60^\circ$

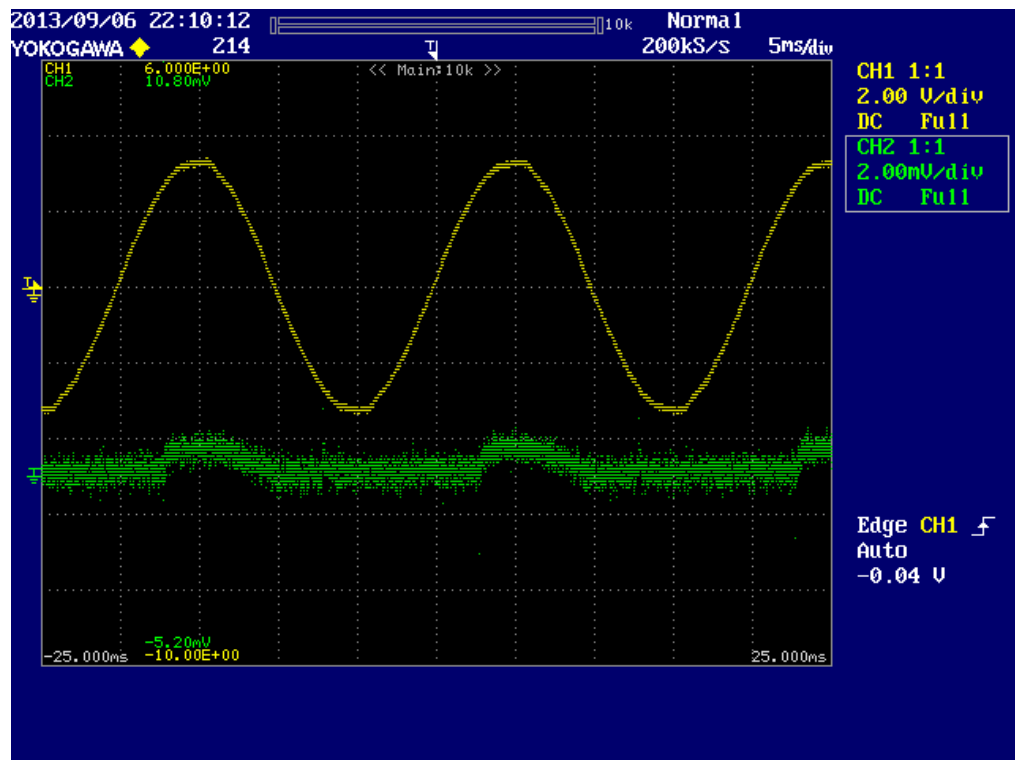


Diagramm 15: Netzspannung und Laststrom I_{L1} von positiver Halbwelle bei $\varphi_z=60^\circ$

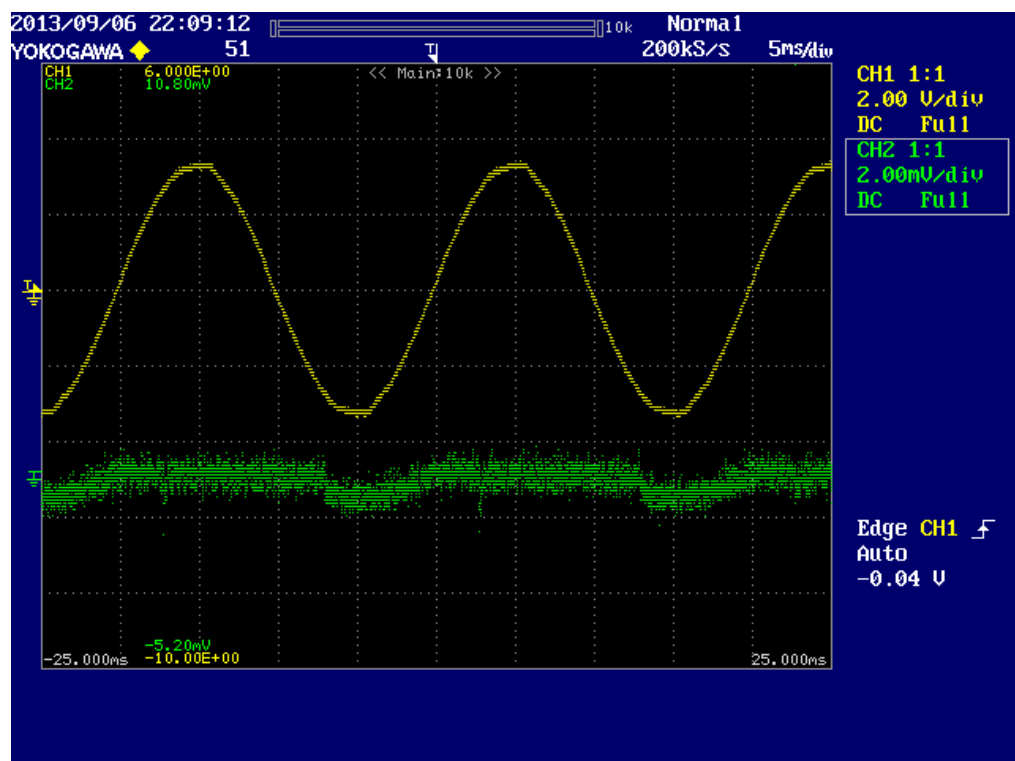


Diagramm 16: Netzspannung und Laststrom I_{L1} von negativer Halbwelle bei $\varphi_z=60^\circ$

- 2) Nehmen Sie mit der Glättungsdrossel (rein induktive Last) folgende Oszillogramme auf:

Thyristorspannung U_{V1} (Y1) und Zündspannung U_Z (Y2) bei $\varphi_Z=60^\circ$
 Lastspannung U_{L1} und Laststrom I_{L1} bei $\varphi_Z=60^\circ$

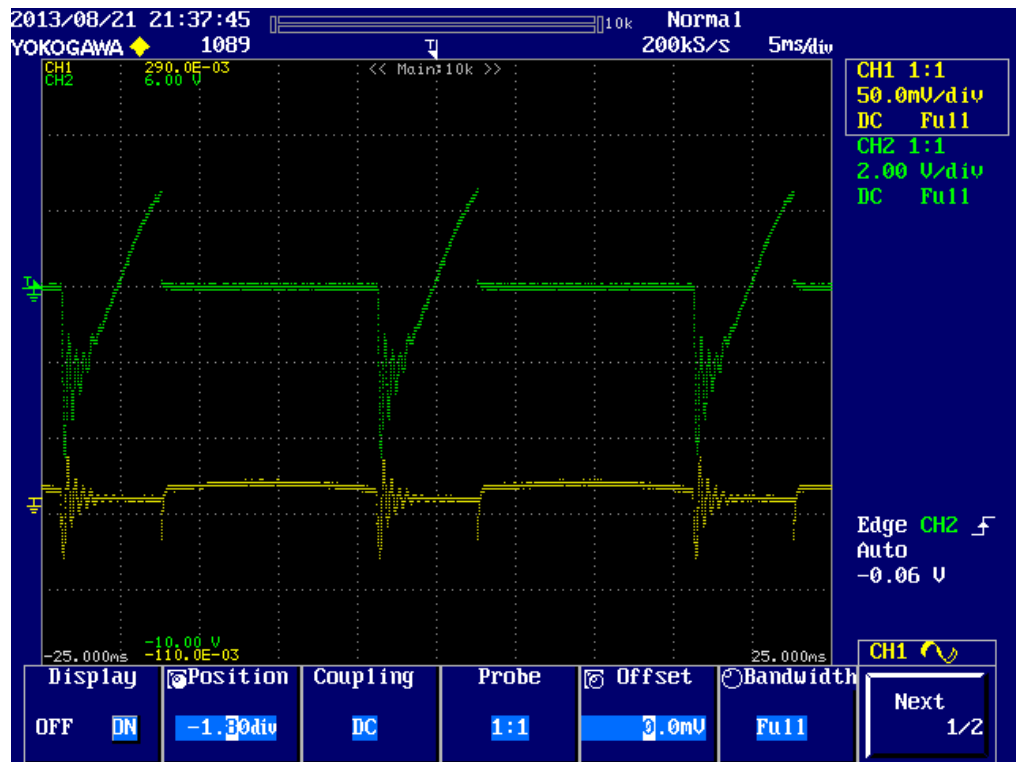


Diagramm 17: Thyristorspannung U_{V1} und Zündspannung U_Z bei $\varphi_Z=60^\circ$

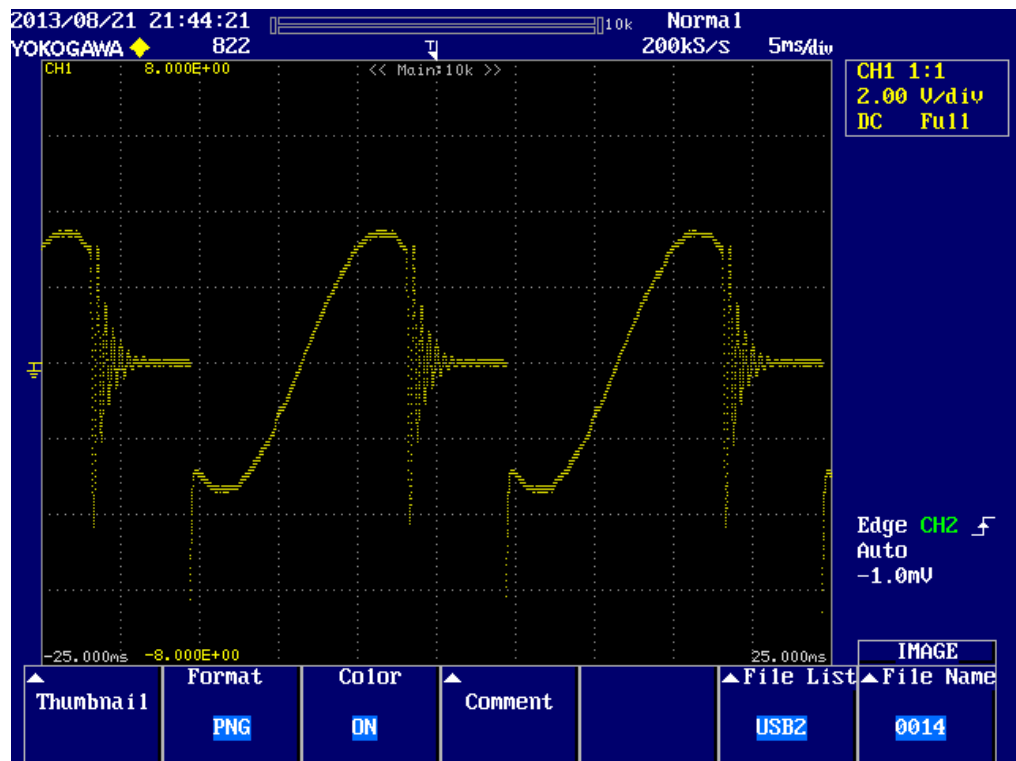


Diagramm 18: Lastspannung U_{L1} bei $\varphi_Z=60^\circ$

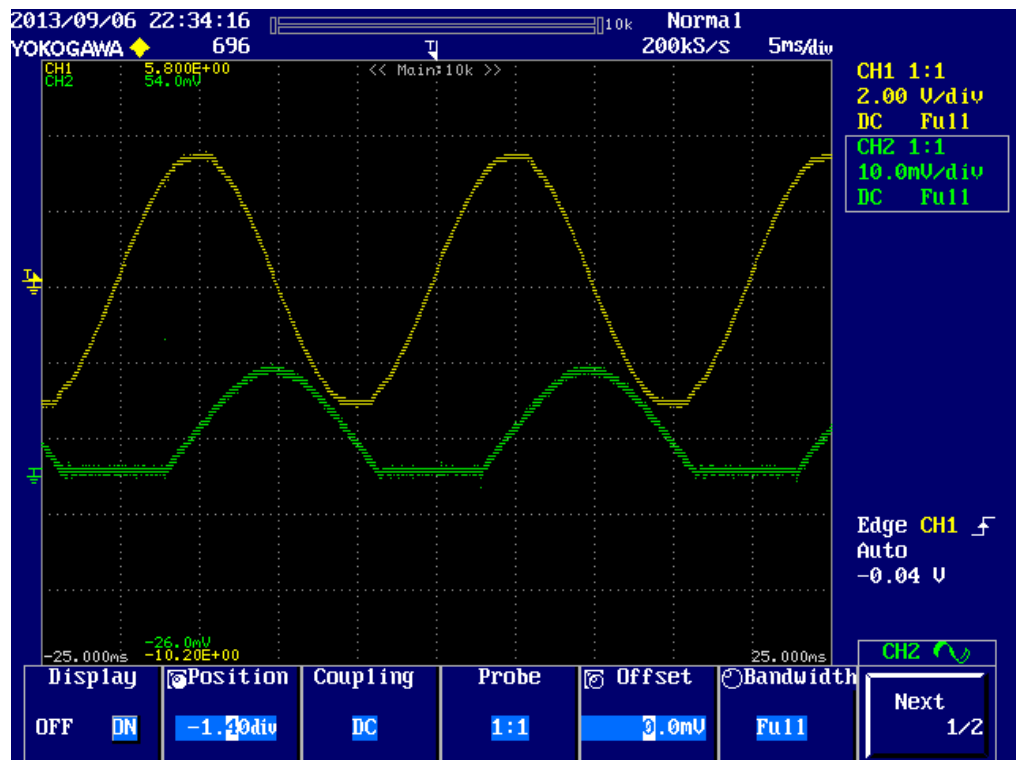


Diagramm 19: Netzspannung und Laststrom I_{L1} von positiver Halbwelle bei $\varphi_z=60^\circ$

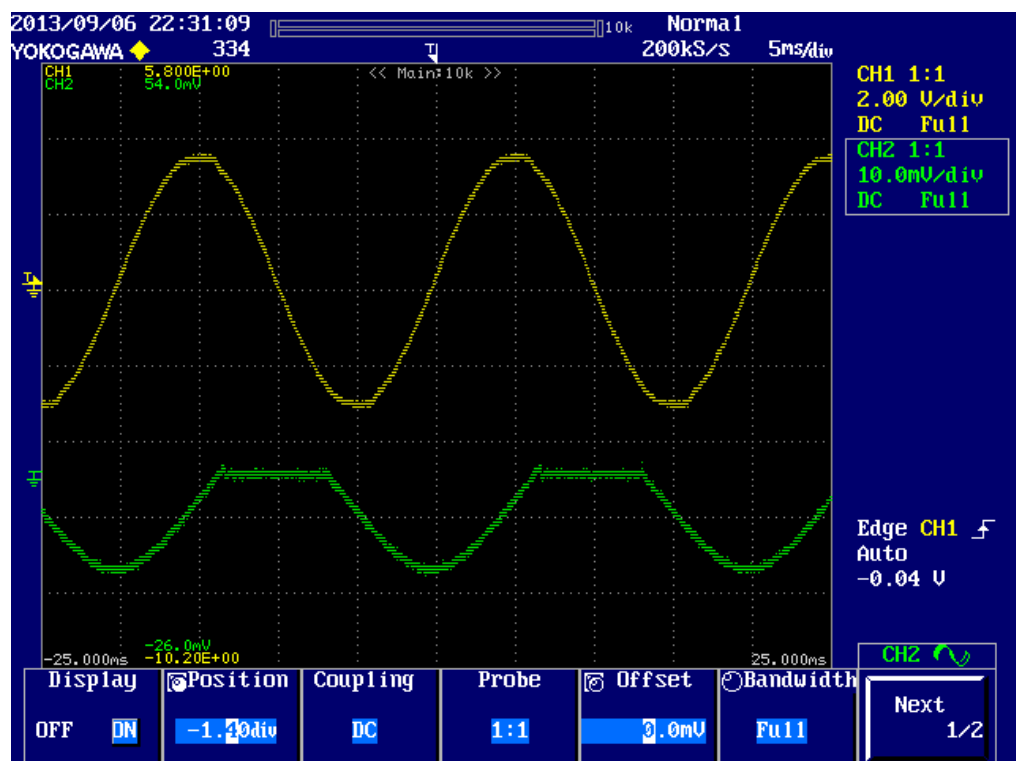


Diagramm 20: Netzspannung und Laststrom I_{L1} von negativer Halbwelle bei $\varphi_z=60^\circ$

- 4) Nehmen Sie mit der 100W-Universalmaschine (gemischt ohmsch/induktive Last) folgende Oszillogramme auf:

Thyristorspannung U_{V1} (Y2) und Zündspannung U_z (Y1) bei $\varphi_z=120^\circ$

Lastspannung U_{L1} und Laststrom I_{L1} bei $\varphi_Z=120^\circ$

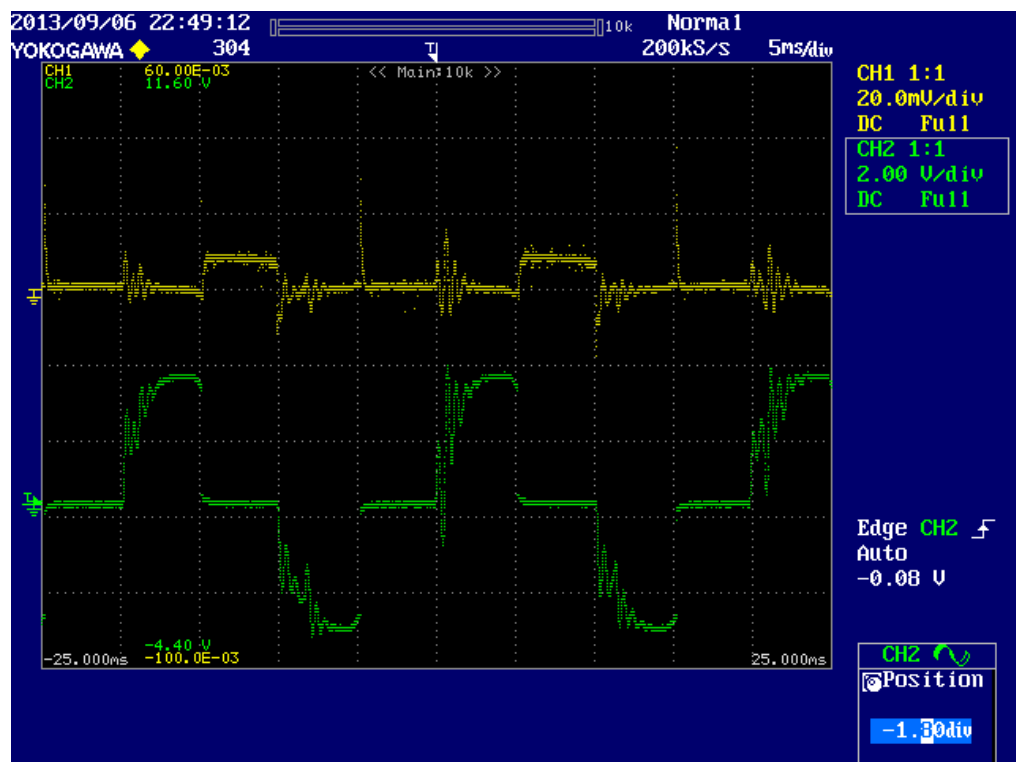


Diagramm 21: Thyristorspannung U_{V1} und Zündspannung U_Z bei $\varphi_Z=120^\circ$

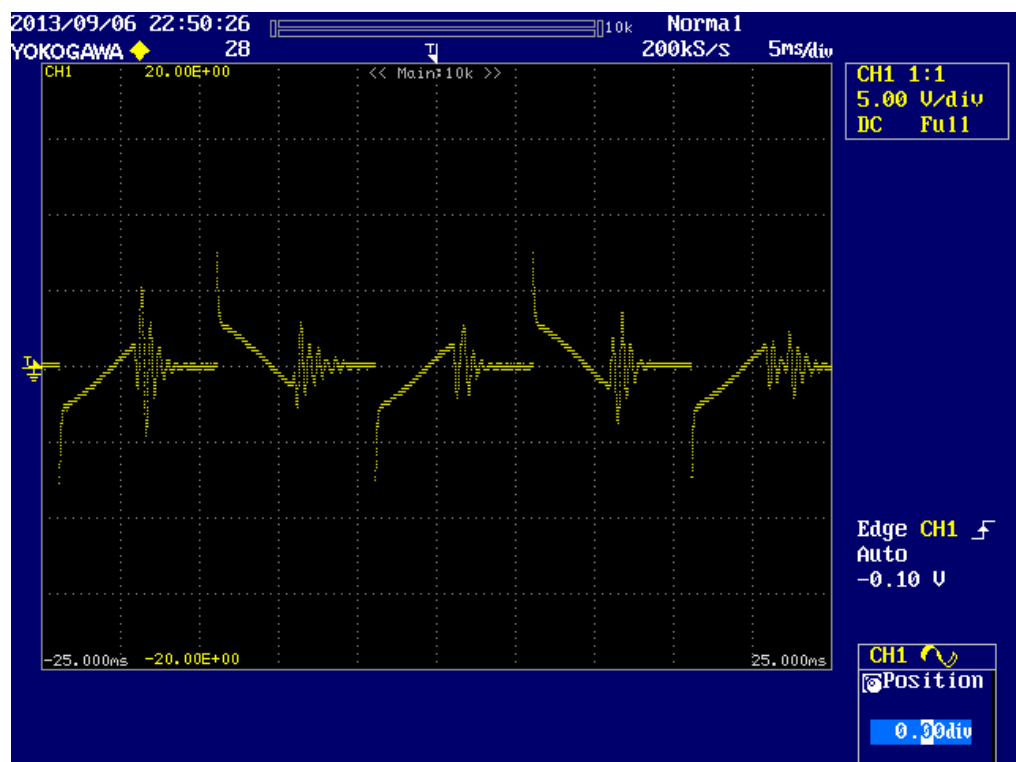
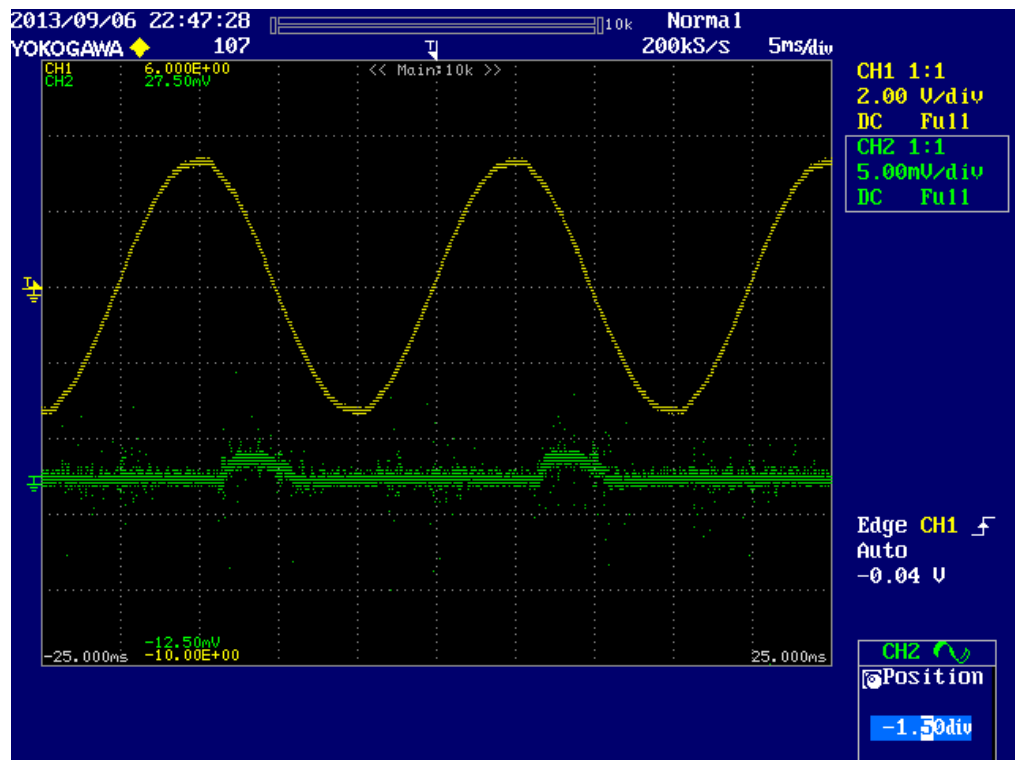
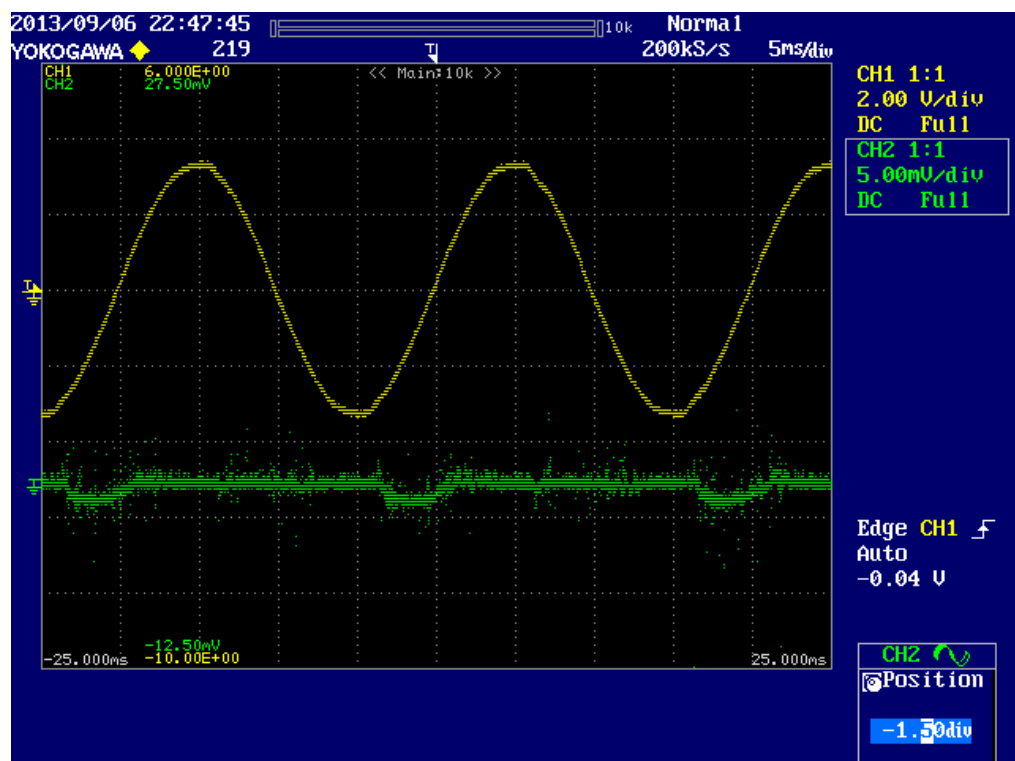


Diagramm 22: Lastspannung U_{L1} bei $\varphi_Z=120^\circ$

Diagramm 23: Netzspannung und Laststrom I_{L1} von positiver Halbwelle bei $\varphi_z=120^\circ$ Diagramm 24: Netzspannung und Laststrom I_{L1} von negativer Halbwelle bei $\varphi_z=120^\circ$

6 Schutz und Beschaltung

In dem Kapitel wird ein kurzer Überblick über den Schutz gegen Überspannungen und Überströme im Kurzzeitbereich gegeben. Das betrifft insbesondere den Schutz, der durch Schutzorgane und Beschaltungen erreicht wird.

6.1 Schutz vor Überspannung

Thyristoren sind besonders empfindlich gegen Überspannungsspitzen oder aber unzulässige Erwärmung des Siliziumplättchens im Gehäuse. Wird der Haltestrom unterschritten, tritt in den dicken, großflächigen PN-Schichten eines Thyristors ein sogenannter Träger-Speicher-Effekt bzw. Träger-Stau-Effekt (TSE) auf. Nach dem Ausschalten bzw. Sperrvorgang erlischt der Laststrom nicht sofort im Spannungsnulldurchgang, da die Rekombinationsvorgänge in der Silizium-Tablette noch nicht abgeschlossen sind, sondern fließt zunächst wegen der noch gespeicherten Ladung in gleicher Richtung weiter (Kondensatorverhalten).

Die Leitfähigkeit des Leistungshalbleiters bleibt solange aufrechterhalten. Erst nach einer bestimmten Zeit, der Freiwerdezeit t_q , (40-100µs) sind die PN-Übergänge von Ladungsträgern ausgeräumt, so dass die Sperrspannung in Vorwärtsrichtung wie der angelegt werden kann ohne selbständig durchzuschalten.

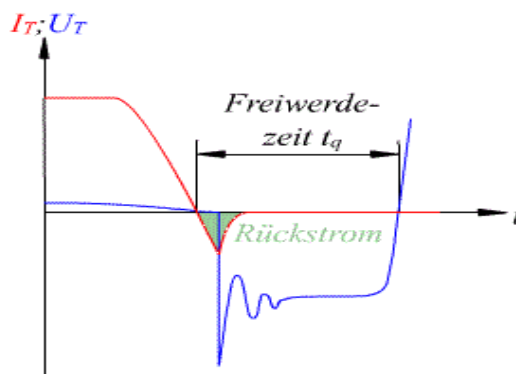


Abbildung 6- 1: Freiwerdezeit am Thyristor

Wenn also z.B. induktive Lasten gesteuert werden, wie es bei der Drehzahlsteuerung von Universalmotoren der Fall ist, induziert der dargestellte steil abreißende Rückstrom in den Induktivitäten (Motorwicklungen) des Stromkreises sehr hohe Spannungen innerhalb enorm kurzer Zeiträume, welche für den Thyristor "lebensgefährlich" sein können.

RC – Beschaltung

Um die sogenannte kritische Spannungssteilheit $\Delta u/\Delta t$ zu begrenzen, wird als TSE-Schutzbeschaltung ein RC-Glied parallel zum Betriebsstromteil des Leistungshalbleiters geschaltet. Der Kondensator unterdrückt Überspannungsspritzen, da er im ersten Moment stark niederohmig ist. Einer Überspannung wird umso stärker entgegengewirkt, je größer die Kapazität C ist. Die notwendige Größe ist von den dynamischen Verhalten des Leistungshalbleiters und von den Gegebenheiten der Schaltung abhängig.

Der Widerstand R bestimmt zusammen mit der Rückstromspitze den Spannungssprung beim Rückstromabriss, sollte daher also nicht zu groß gewählt werden. Andererseits darf der Beschaltungswiderstand nicht zu klein werden, da er den sehr steil ansteigenden Entladestrom des Beschaltungskondensators beim Einschalten des Thyristors auf einen ungefährlichen Wert begrenzen muss.

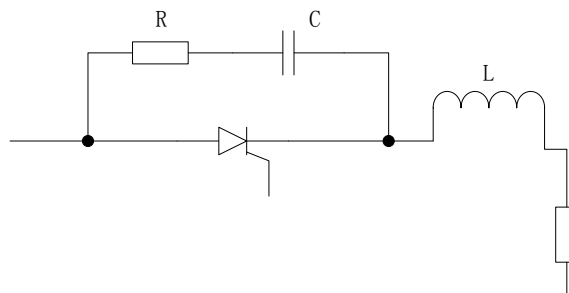


Abbildung 6- 2: TSE-Schutzbeschaltung

Brückenbeschaltung

Schließt man Überspannungsbeschaltungen über eine Gleichrichterschaltung an den Leistungshalbleiter an, so wird hierdurch eine Entladung des Beschaltungskondensators über den Leistungshalbleiter verhindert und es kann dann außer der normalen RC-Beschaltung ein weiterer Kondensator C_2 zum Schutz vor zu hoher Spannungsanstiegsgeschwindigkeit vorgesehen werden. Der zugehörige Entladewiderstand R_2 dient gleichzeitig zur Steuerung der Spannungsaufteilung bei der Reihenschaltung mehrerer Ventile. Diese aufwendige Beschaltung wird speziell bei sehr hoch beanspruchten Leistungshalbleitern verwendet.

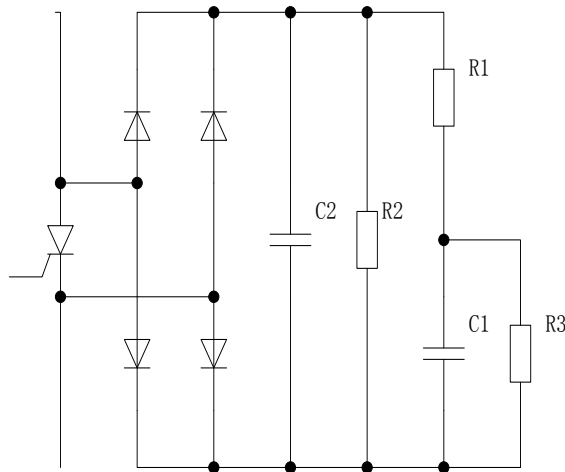


Abbildung 6- 3: Brückenbeschaltung

6.2 Schutz vor Überstrom

Eine ungewollte, extrem hohe Überlastung ergibt sich häufig beim Durchbrennen des Glühfadens einer Glühlampe: Beim Fadenbruch durch den auftretenden Funken das Füllgas der Lampe ionisiert, so dass innerhalb der Lampe ein Lichtbogen entsteht, der praktisch einen Kurzschluss bildet.

Dadurch steigt der Laststrom kurzzeitig stark an.

Ein weiteres Problem, dass besonders bei Dimmen auftritt, stellt der niedrige Kaltwiderstand der Glühlampen im Einschaltaugenblick dar, wo bis zum zehnfach des Nennstromes fließen kann.

Die Stromleitung beginnt innerhalb des Bauteils punktuell und breitet sich dann gleichmäßig über die Oberfläche des Silizium-Plättchens aus.

Wegen der anfänglich sehr hohen Stromdichte gibt der Hersteller eine kritische Stromsteilheit $\Delta i / \Delta t$ an, die besonders bei Leistungstypen durch die Reihenschaltung einer Schutzinduktivität als Strombegrenzungs-drossel gedämpft werden muss.

In dieser Spule wird durch die steilen Stromimpuls eine Spannung induziert. Die Induktionsspannung hat einen Strom zufolge, der seiner Ursache, nämlich der steilen Laststromflanke entgegenwirkt diese unterdrückt.

Zum anderen muss das gewählte Überstromschutzorgan den Einschaltstrom von einem eventuellen Kurzschluss unterscheiden können.

Diese unterschiedlichen Anforderungen zum Schutz des Leistungshalbleiters vor Überstrom erfüllt in der Regel eine Schmelzsicherung mit exakt definierten Kennwerten, die in Reihe zum Thyristor und zur Last im Stromkreis liegt.

Beim Sicherungswechsel ist es deshalb äußerst wichtig, wieder eine Sicherung mit gleicher Auslösecharakteristik, gleicher Nennspannung, gleichem Nennstrom und gleichem Abschaltvermögen einzusetzen.

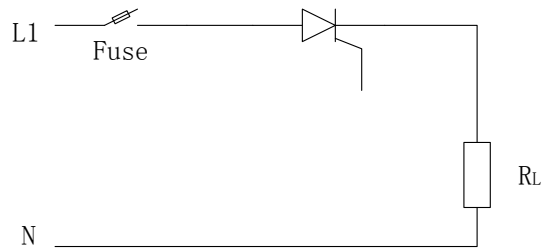


Abbildung 6- 4: Schmelzsicherung

Literatur

[JAST11]	Jäger, Rainer; Stein, Edgar: Leistungselektronik - Grundlagen und Anwendungen 6., aktualisierte Auflage, Berlin; Offenbach, VDE VERLAG GMBH, 2011
[SPJO09]	Specovius, Joachim: Grundkurs Leistungselektronik - 3. Auflage Wiesbaden, Vieweg+Teubner, 2009
[FEBU06]	Felderhoff, Rainer; Busch, Udo: Leistungselektronik - 4., neu bearbeitete Auflage München Wien, HANSER VERLAG, 2006
[JAST12]	Jäger, Rainer; Stein, Edgar: Übungen zur Leistungselektronik 2., aktualisierte Auflage, Berlin; Offenbach, VDE VERLAG GMBH, 2012
[LAFR93]	Lappe, Rudolf; Friedrich, Fischer: Leistungselektrotronik - Messtechnik - 2., stark bearbeitete Auflage, Berlin; München: Verl. Technik. 1993
[06]	Leistungselektronik-Phasenanschnittsteuerung, Bestell.Nr. 2GA 3007-2A, Siemens AG, ANL A 245
[07]	< http://de.wikipedia.org/wiki/Thyristor >, verfügbar am 11.09.2013
[08]	< http://de.wikipedia.org/wiki/Phasenanschnittsteuerung >, verfügbar am 11.09.2013

[09]	< http://www.mouser.com/ds/2/196/tca785_green_050217-98657.pdf >, verfügbar am 11.09.2013
[10]	< http://www.adapted-solutions.com/web/ASProduktPortunusUeberblick.html >, verfügbar am 11.09.2013
[11]	< http://www.doc88.com/p-292167796538.html >, verfügbar am 11.09.2013

Selbstständigkeitserklärung

Hiermit erkläre ich, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig und nur unter Verwendung der angegebenen Literatur und Hilfsmittel angefertigt habe.

Stellen, die wörtlich oder sinngemäß aus Quellen entnommen wurden, sind als solche kenntlich gemacht.

Diese Arbeit wurde in gleicher oder ähnlicher Form noch keiner anderen Prüfungsbehörde vorgelegt.

Mittweida, den 11. November 2013

Hang Zhao